



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

TUGAS AKHIR - EE184801

**STUDI KOORDINASI PROTEKSI PADA SISTEM KELISTRIKAN
PT. PUPUK SRIWIDJAJA PALEMBANG (PUSRI) IB DENGAN
MEMPERTIMBANGKAN *ARC FLASH***

Aditya Catur Nugraha
NRP 07111340000078

Dosen Pembimbing
Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
Ir. Sjamsjul Anam, MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019



ITS
Institut
Teknologi
Sepuluh Nopember

FINAL PROJECT - EE184801

***PROTECTION COORDINATION STUDY OF PT. PUPUK
SRIWIDJAJA PALEMBANG (PUSRI) IB ELECTRICAL SYSTEM
CONSIDERING ARC FLASH***

Aditya Catur Nugraha
NRP 07111340000078

Advisor
Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
Ir. Sjamsjul Anam, MT.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2019

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul **Studi Koordinasi Proteksi pada Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Sriwidjaja Palembang (Pusri) IB dengan Mempertimbangkan Arc Flash**, adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, 21 Januari 2019



Aditya Catur Nugraha
NRP. 0711134000078

**Studi Koordinasi Proteksi pada Sistem Kelistrikan PT.
Pupuk Sriwidjaja Palembang (Pusri) IB dengan
Mempertimbangkan Arc Flash**

TUGAS AKHIR

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada
Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

Menyetujui:

Dosen Pembimbing I,

Dosen Pembimbing II,

Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
NIP. 196603181990101001

Ir. Sjamsjul Anam, MT.
NIP. 196307251990031002



Studi Koordinasi Proteksi pada Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Sriwidjaja Palembang (Pusri) IB dengan Mempertimbangkan *Arc Flash*

Nama : Aditya Catur Nugraha
Pembimbing I : Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
Pembimbing II : Ir. Sjamsjul Anam, MT.

ABSTRAK

PT. Pupuk Sriwidjaja Palembang (Pusri) merupakan salah satu produsen pupuk terbesar di Indonesia. Sebagai salah satu pelopor produsen pupuk urea di Indonesia tingkat produktivitas Pusri harus tetap terjaga. Salah satu faktor yang mendukung hal tersebut adalah kontinuitas suplai daya dan lingkungan kerja yang aman bagi para pekerja Pusri. Salah satu penyebab terputusnya suplai daya yaitu terjadinya gangguan hubung singkat. Gangguan hubung singkat juga dapat menyebabkan fenomena busur api yang berbahaya bagi manusia maupun peralatan itu sendiri. Hal ini tentu berdampak langsung pada produktivitas Pusri. Oleh karena itu koordinasi proteksi yang baik dan *Personal Protective Equipment* (PPE) yang sesuai dibutuhkan. Hasil simulasi menggunakan ETAP 12.6 menunjukkan pada kondisi *Existing* sistem kelistrikan Pusri IB terdapat beberapa kesalahan koordinasi yang menyebabkan nilai *incident energy* terlalu besar melebihi standar NFPA 70E 2009, sehingga perlu dilakukan penyetelan ulang pada peralatan-peralatan pengaman. Setelah melakukan *Resetting* koordinasi proteksi, dilakukan simulasi dan perhitungan menggunakan standar IEEE 1584-2002 untuk menentukan PPE yang sesuai dengan kategori risiko bahaya pada daerah tersebut. Hasil dari *Resetting* koordinasi proteksi adalah terdapat beberapa perubahan nilai *incident energy* baik peningkatan maupun penurunan karena pada kondisi sebelumnya terdapat peralatan pengaman yang bekerja terlalu cepat maupun terlalu lambat. Setelah *Resetting* juga pada *bus-bus* yang memiliki nilai *incident energy* melebihi standar NFPA 70E 2009 mengalami penurunan yang signifikan.

Kata Kunci: Koordinasi Proteksi, *Arc Flash*, *Personal Protective Equipment* (PPE), *Incident Energy*

----- *Halaman Ini Sengaja Dikosongkan* -----

Protection Coordination Study of PT. Pupuk Sriwidjaja Palembang (Pusri) IB Electrical System Considering Arc Flash

Name : Aditya Catur Nugraha
1st Advisor : Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT.
2nd Advisor : Ir. Sjamsjul Anam, MT.

ABSTRACT

PT. Pupuk Sriwidjaja Palembang (Pusri) is one of the biggest fertilizer producers in Indonesia. As one of the pioneers of urea fertilizer producers in Indonesia, Pusri's productivity level must be maintained. One of the supporting factors is power supply continuity and a safe working environment for Pusri workers. One of the causes of power supply disconnection is short circuit fault. Short circuit fault can also cause an arc flash phenomenon that is dangerous for human and the equipment itself. This certainly has a direct impact on Pusri's productivity. Therefore, a good coordination protection and appropriate Personal Protective Equipment (PPE) is needed. The simulation results using ETAP 12.6 show that in the condition of the *Existing* electrical system Pusri IB there are some coordination errors that cause the incident energy value is too big exceeds the NFPA 70E 2009 standard, so the protection equipment needs to be reset. After *Resetting* the protection coordination, simulations and calculations were carried out using the IEEE 1584-2002 standard to determine PPE according to the hazard risk category in the area. The result of *Resetting* protection coordination is that there are several changes in incident energy values, both increases and decreases because in the previous condition there were protection equipment that worked too fast or too slowly. Also, after *Resetting* busses whose incident energy value exceeds the NFPA 70E 2009 have been decreased.

Keywords: Protection Coordination, Arc Flash, Personal Protective Equipment (PPE), Incident Energy

----- *Halaman Ini Sengaja Dikopsonkan* -----

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah Robbil 'Alamin, puji dan syukur dipanjatkan kehadirat Allah SWT atas rahmat kesehatan dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “Studi Koordinasi Proteksi pada Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Sriwidjaja Palembang (Pusri) IB dengan Mempertimbangkan *Arc Flash*” tepat pada waktunya dan *InshaAllah* bermanfaat di kemudian hari *Amin Ya Rabbal 'Alamin*. Adapun tujuan dari penyusunan Tugas Akhir ini adalah sebagai salah satu persyaratan untuk mendapatkan gelar sarjana teknik pada bidang studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya.

Pada kesempatan ini penulis ingin berterima kasih kepada pihak-pihak yang telah memberikan dukungan dalam bentuk apapun, yaitu:

1. Allah SWT, karena tanpa nikmat kesehatan fisik, akal, dan pikiran dari-Nya mustahil Tugas Akhir ini dapat diselesaikan
2. Segenap keluarga besar di Morotai Abah, Ibu, Aak, Mbak Ika, dan Mbak Kiki yang selalu mendukung dalam kondisi apapun dalam bentuk apapun terima kasih semuanya
3. Bapak Dr. Ir. Margo Pujiantara, MT. dan Bapak Ir. Sjamsjul Anam, MT. yang telah membimbing saya selama pengerjaan Tugas Akhir ini, tidak bosan menjawab semua pertanyaan-pertanyaan kecil saya, terima kasih banyak Pak.
4. Tedi, Memet, Rona, Kemal, dan Baihaqi yang telah membantu mengajarkan saya tentang Tugas Akhir ini.
5. Seluruh rekan E53, E54, E55, E56 dan seluruh warga Fakultas Teknologi Elektro terima kasih atas bantuan apapun yang pernah kalian berikan.
6. Nunung, Bos, Wildan, Paung, dan Saddam terima kasih telah menemani saya dari awal tetapi meninggalkan saya lebih dulu tetapi menjadi motivasi bagi saya untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini. Terima kasih untuk waktu-waktu berharga yang telah kalian berikan selama di Surabaya.
7. Tulva Hafiyer Alhalim, sosok yang selalu mengingatkan penulis untuk menyelesaikan Tugas Akhir ini, mengingatkan makan, dan mengingatkan sholat lima waktu dan mengaji.

Penulis berharap Tugas Akhir ini dapat memberikan manfaat bagi banyak pihak. Penulis meminta maaf apabila terdapat kesalahan dalam penulisan Tugas Akhir ini. Penulis juga mengharapkan kritik dan saran yang membangun agar penulis dapat menjadi lebih baik lagi di kemudian hari.

Surabaya, 21 Januari 2019

Penulis

DAFTAR ISI

JUDUL

LEMBAR PERNYATAAN KEASILAN

LEMBAR PENGESAHAN

ABSTRAK i

ABSTRACT iii

KATA PENGANTAR v

DAFTAR ISI vii

DAFTAR GAMBAR xi

DAFTAR TABEL xiii

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1	Latar Belakang	1
1.2	Rumusan Masalah	2
1.3	Batasan Masalah	2
1.4	Tujuan	2
1.5	Metodologi	3
1.6	Sistematika Penulisan	3
1.7	Relevansi	4

BAB 2 GANGGUAN SISTEM TENAGA LISTRIK DAN ARC

FLASH

2.1	Proteksi Sistem Tenaga Listrik	5
2.2	Gangguan Sistem Tenaga Listrik	5
2.3	Gangguan Beban Lebih	5
2.4	Gangguan Hubung Singkat	6
2.5	Rele Arus Lebih (<i>Over Current Relay</i>)	6
2.5.1	Rele Arus Lebih Waktu <i>Inverse</i>	7
2.5.2	Rele Arus Lebih Waktu Instan	7
2.5.3	Rele Arus Lebih Waktu Tertentu	8
2.6	Pengaturan Rele Arus Lebih	9
2.6.1	Pengaturan Rele Arus Lebih Waktu <i>Inverse</i>	9
2.6.2	Pengaturan Rele Arus Lebih Waktu Instan	10
2.6.3	Koordinasi Waktu Kerja Rele	10
2.7	Pengertian <i>Arc Flash</i>	11
2.8	<i>Flash Protection Boundary</i>	12
2.9	Perhitungan Energi Busur Api Menggunakan Standar IEEE 1584-2002	13

2.10	Perhitungan <i>Flash Protection Boundary</i> Menggunakan Standar IEEE 1584-2002	16
2.11	Pengelompokkan Insiden Energi dan Penentuan <i>Personal Protective Equipment</i> (PPE) Menggunakan Standar NFPA 70E-2009	16

BAB 3 SISTEM KELISTRIKAN PT. PUPUK SRIWIDJAJA PALEMBANG (PUSRI) IB

3.1	Sistem Kelistrikan Pusri IB.....	19
3.2	Sistem Pembangkitan Pusri IB.....	20
3.3	Data Transformator pada Pusri IB	20
3.4	Data Kabel pada Pusri IB.....	21
3.5	Data Beban Motor pada Pusri IB	24
3.6	Data Beban Statis pada Pusri IB	25
3.7	Data Beban <i>Lump</i> pada Pusri IB	25
3.8	Sistem Pengaman Arus Lebih.....	27

BAB 4 KOORDINASI PROTEKSI DAN ANALISIS FENOMENA ARC FLASH

4.1	Pemodelan Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Sriwidjaja Palembang (Pusri) IB	31
4.2	Pemilihan Tipikal Koordinasi Proteksi Pusri IB.....	32
4.3	Analisis Arus Gangguan Hubung Singkat	32
4.4	Analisis Hubung Singkat Minimum	33
4.5	Analisis Hubung Singkat Maksimum	33
4.6	Koordinasi Rele Arus Lebih	34
4.6.1	Koordinasi Rele Arus Lebih Tipikal 1.....	35
4.6.2	Koordinasi Rele Arus Lebih Tipikal 2.....	46
4.6.3	Koordinasi Rele Arus Lebih Tipikal 3.....	53
4.7	Hasil Simulasi <i>Arc Flash</i> pada Kondisi <i>Existing</i>	59
4.8	Perhitungan <i>Arc Flash</i> pada Kondisi <i>Existing</i>	60
4.9	Perbandingan Hasil Simulasi dengan Perhitungan <i>Arc Flash</i> pada Kondisi <i>Existing</i>	66
4.10	Hasil Simulasi <i>Arc Flash</i> pada Kondisi <i>Resetting</i>	67
4.11	Perhitungan <i>Arc Flash</i> pada Kondisi <i>Resetting</i>	68
4.12	Perbandingan Hasil Simulasi dengan Perhitungan <i>Arc Flash</i> pada Kondisi <i>Resetting</i>	74

4.13	Perbandingan <i>Personal Protective Equipment</i> (PPE) yang Dibutuhkan pada Kondisi <i>Existing</i> dan <i>Resetting</i>	75
------	--	----

BAB 5 PENUTUP

5.1	Kesimpulan.....	83
5.2	Saran	84

DAFTAR PUSTAKA	87
-----------------------------	----

BIOGRAFI PENULIS	89
-------------------------------	----

----- *Halaman Ini Sengaja Dikopsonkan* -----

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Karakteristik Beberapa Jenis Rele Waktu <i>Inverse</i> Menurut Standar IEC 60255-3 dan <i>British Standard 142</i> (BS 142).....	7
Gambar 2.2	Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Instan.....	8
Gambar 2.3	Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Tertentu	8
Gambar 2.4	Rele Arus Lebih Pengaman Transformator	11
Gambar 2.5	<i>Flash Protection Boundary</i>	12
Gambar 2.6	<i>Personal Protective Equipment</i> (PPE).....	18
Gambar 3.1	<i>Single Line Diagram</i> Pusri IB.....	19
Gambar 4.1	Pemilihan Tipikal Sistem Kelistrikan Pusri IB	32
Gambar 4.2	SLD Tipikal 1	35
Gambar 4.3	Time Current Curve Kondisi <i>Existing</i> Tipikal 1	36
Gambar 4.4	Time Current Curve Kondisi <i>Resetting</i> Tipikal 1	45
Gambar 4.5	SLD Tipikal 2	46
Gambar 4.6	Time Current Curve Kondisi <i>Existing</i> Tipikal 2	47
Gambar 4.7	Time Current Curve Kondisi <i>Resetting</i> Tipikal 2	52
Gambar 4.8	SLD Tipikal 3	53
Gambar 4.9	Time Current Curve Kondisi <i>Existing</i> Tipikal 3	54
Gambar 4.10	Time Current Curve Kondisi <i>Resetting</i> Tipikal 3	59

-----*Halaman Ini Sengaja Dikosongkan*-----

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Koefisien Inverse untuk Time Dial	10
Tabel 2.2	Data Paramater-Parameter yang Diperlukan untuk Perhitungan Insiden Energi	15
Tabel 2.3	Kategori Bahaya Berdasarkan Insiden Energi	17
Tabel 2.4	Personal Protective Equipment (PPE)	17
Tabel 3.1	Data Spesifikasi Generator	20
Tabel 3.2	Data Spesifikasi Transformator	20
Tabel 3.3	Data Spesifikasi Kabel	21
Tabel 3.4	Data Spesifikasi Motor	24
Tabel 3.5	Data Beban Statis	25
Tabel 3.6	Data Beban <i>Lump</i>	26
Tabel 3.7	Spesifikasi LVCB 1 pada Kondisi <i>Existing</i>	27
Tabel 3.8	Spesifikasi Relay 1 pada Kondisi <i>Existing</i>	27
Tabel 3.9	Spesifikasi Relay 2 pada Kondisi <i>Existing</i>	28
Tabel 3.10	Spesifikasi Relay 3 pada Kondisi <i>Existing</i>	28
Tabel 3.11	Spesifikasi Relay 4 pada Kondisi <i>Existing</i>	28
Tabel 3.12	Spesifikasi Relay 5 pada Kondisi <i>Existing</i>	28
Tabel 3.13	Spesifikasi Relay 6 pada Kondisi <i>Existing</i>	29
Tabel 3.14	Spesifikasi Relay 7 pada Kondisi <i>Existing</i>	29
Tabel 3.15	Spesifikasi Relay 8 pada Kondisi <i>Existing</i>	29
Tabel 3.16	Spesifikasi Relay 9 pada Kondisi <i>Existing</i>	30
Tabel 3.17	Spesifikasi Relay 10 pada Kondisi <i>Existing</i>	30
Tabel 3.18	Spesifikasi Relay 11 pada Kondisi <i>Existing</i>	30
Tabel 4.1	Data Arus Hubung Singkat Minimum pada <i>Bus</i> Utama....	33
Tabel 4.2	Data Arus Hubung Singkat Maksimum pada <i>Bus</i> Utama..	34
Tabel 4.3	Spesifikasi dan Data Penunjang <i>Setting</i> LVCB 1	38
Tabel 4.4	Spesifikasi dan Data Penunjang <i>Setting</i> Relay 1	39
Tabel 4.5	Spesifikasi dan Data Penunjang <i>Setting</i> Relay 2	40
Tabel 4.6	Spesifikasi dan Data Penunjang <i>Setting</i> Relay 3	41
Tabel 4.7	Spesifikasi dan Data Penunjang <i>Setting</i> Relay 4	43
Tabel 4.8	Spesifikasi dan Data Penunjang <i>Setting</i> Relay 5	48
Tabel 4.9	Spesifikasi dan Data Penunjang <i>Setting</i> Relay 6	49
Tabel 4.10	Spesifikasi dan Data Penunjang <i>Setting</i> Relay 7	50
Tabel 4.11	Spesifikasi dan Data Penunjang <i>Setting</i> Relay 8	55
Tabel 4.12	Spesifikasi dan Data Penunjang <i>Setting</i> Relay 9	56
Tabel 4.13	Spesifikasi dan Data Penunjang <i>Setting</i> Relay 10	57
Tabel 4.14	Data Hasil Simulasi <i>Arc Flash</i> pada Kondisi <i>Existing</i>	60

Tabel 4.15	Data <i>Bus</i> Kondisi <i>Existing</i> untuk Perhitungan Manual	60
Tabel 4.16	Perbandingan Hasil Simulasi dengan Perhitungan <i>Arc Flash</i> pada Kondisi <i>Existing</i>	67
Tabel 4.17	Data Hasil Simulasi <i>Arc Flash</i> pada Kondisi <i>Resetting</i>	67
Tabel 4.18	Data <i>Bus</i> Kondisi <i>Resetting</i> Untuk Perhitungan Manual...	68
Tabel 4.19	Perbandingan Hasil Simulasi dengan Perhitungan <i>Arc Flash</i> pada Kondisi <i>Resetting</i>	75
Tabel 4.20	PPE yang Dibutuhkan untuk Kondisi <i>Existing</i>	75
Tabel 4.21	PPE yang Dibutuhkan untuk Kondisi <i>Resetting</i>	77
Tabel 4.22	Perbandingan PPE yang Dibutuhkan pada Kondisi <i>Existing</i> dan <i>Resetting</i>	80

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

PT. Pupuk Sriwidjaja Palembang (Pusri) adalah perusahaan yang didirikan sebagai pelopor produsen pupuk urea di Indonesia pada tanggal 24 Desember 1959 di Palembang Sumatera Selatan, dengan nama PT Pupuk Sriwidjaja (Persero). Pusri memulai operasional usaha dengan tujuan utama untuk melaksanakan dan menunjang kebijaksanaan dan program pemerintah di bidang ekonomi dan pembangunan nasional, khususnya di industri pupuk dan kimia lainnya. Sejarah panjang Pusri sebagai pelopor produsen pupuk nasional selama lebih dari 50 tahun telah membuktikan kemampuan dan komitmen Pusri dalam melaksanakan tugas penting yang diberikan oleh pemerintah.

Pabrik PUSRI IB merupakan pabrik yang dibangun sebagai pengganti pabrik PUSRI I yang telah dinyatakan tidak efisien lagi. Tanggal 15 Januari 1990 merupakan *Early Start Date* untuk memulai kegiatan *Process Engineering Design Package*. Tanggal 1 Mei 1990 merupakan *effective date* dari pelaksanaan pembangunannya dan diresmikan oleh Presiden Republik Indonesia pada tanggal 22 Desember 1994. PUSRI IB memiliki kapasitas produksi 446.000 ton amonia per tahun dan 570.000 ton urea per tahun. Pabrik ini menerapkan teknologi proses pembuatan amonia dan urea hemat energi dengan efisiensi 30% lebih hemat dari pabrik-pabrik PUSRI yang ada. Ruang lingkup Pusri IB mencakup satu unit pabrik amonia berkapasitas 1.350 ton per hari atau 396.000ton per tahun. Satu unit pabrik urea berkapasitas 1.725 ton per hari atau 570.000 ton per tahun dan satu unit utilitas, *offsite* dan *auxiliary*.

Busur api (*arc flash*) adalah peristiwa lewatnya arus listrik melalui udara yang berada di antara konduktor dari fasa ke fasa atau dari fasa ke *ground*, suhu udara yang dilewati arus tersebut dapat mencapai 35.000°F. *Arc flash* disebabkan karena adanya gangguan arus atau *arching fault* pada sebuah sistem kelistrikan. Gangguan ini dapat berupa kegagalan mekanik, kegagalan isolasi, korosi atau kesalahan manusia. *Arc flash* dapat menimbulkan ledakan, panas, tekanan yang besar bahkan kebakaran. Efek ini dapat merusak peralatan dan kecelakaan yang fatal pada pekerja.

Oleh karena itu terjadinya peristiwa *arc flash* dapat mengganggu keberlangsungan *supply* daya listrik dan mengancam keselamatan

karyawan Pusri. Hal tersebut dapat berdampak langsung terhadap produktivitas Pusri. Sehingga peran peralatan-peralatan pengaman listrik dan koordinasinya sangat dibutuhkan untuk meminimalisir dampak yang ditimbulkan oleh gangguan tersebut. Penggunaan perlengkapan perlindungan yang sesuai standar juga dapat meningkatkan keselamatan kerja karyawan Pusri.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang dibahas dalam tugas akhir ini yaitu:

1. Koordinasi proteksi peralatan-peralatan pengaman pada sistem kelistrikan Pusri IB
2. Kategori insiden energi dan batasan jarak pekerja terhadap bahaya arc flash pada sistem kelistrikan Pusri IB
3. *Personal Protective Equipment* (PPE) yang seharusnya digunakan pekerja Pusri IB sesuai standar NFPA 70E

1.3 Batasan Masalah

Batasan masalah pada penelitian ini yaitu:

1. Simulasi dan analisis menggunakan *software* ETAP 12.6
2. Koordinasi proteksi meliputi *setting Low Voltage Circuit Breaker* (LVCB) dan *relay* gangguan fasa
3. Simulasi dan perhitungan insiden energi menggunakan standar IEEE 1584-2002
4. Penentuan *Personal Protective Equipment* (PPE) menggunakan standar NFPA 70E 2009

1.4 Tujuan

Tujuan dari tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Melakukan analisis dan *Resetting* koordinasi peralatan proteksi kelistrikan pada Pusri IB.
2. Mengetahui daerah kategori bahaya insiden energi *arc flash* yang terjadi pada Pusri IB.
3. Mengetahui *Personal Protective Equipment* (PPE) yang sesuai saat berada di daerah insiden energi tersebut berdasarkan standar NFPA 70E.

1.5 Metodologi

Metode yang digunakan dalam tugas akhir ini terdiri dari studi literatur, pengumpulan data, pemodelan sistem, simulasi, analisis hasil data, kesimpulan, dan penyusunan laporan.

1. Studi Literatur

Tahap ini merupakan tahap paling awal dalam proses pengerjaan tugas akhir yaitu menemukan dan mempelajari literatur-literatur yang terkait dengan koordinasi proteksi dan *arc flash*

2. Pengumpulan Data

Tahap ini adalah tahap dimana kegiatan pengumpulan data-data penunjang yang diperlukan. Dalam tugas akhir ini data yang diperlukan yaitu, *single line diagram* dan spesifikasi peralatan sistem kelistrikan Pusri IB

3. Perancangan Model Sistem

Pada tahap ini dengan data-data yang telah diperoleh, dilakukan perancangan model sistem kelistrikan Pusri IB menggunakan *software* ETAP 12.6

4. Simulasi, Perhitungan, dan Perbandingan

Dari model sistem yang telah dirancang dan spesifikasi peralatan yang telah diketahui dilakukan simulasi dan perhitungan yang kemudian dilakukan perbandingan dari kedua hasil tersebut

5. Analisis

Setelah melakukan simulasi dari data-data yang didapatkan akan dianalisis kemudian diolah kedalam bentuk narasi pembahasan.

6. Kesimpulan dan Penyusunan Laporan

Setelah melakukan analisis pada hasil simulasi ditarik kesimpulan dari kondisi-kondisi yang ada. Kemudian dilakukan penyusunan laporan tugas akhir dalam bentuk buku

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan yang dilakukan pada tugas akhir ini dibagi dalam lima bab dengan deskripsi sebagai berikut:

Bab I: Pendahuluan

Pada bab ini akan dibahas tentang latar belakang, permasalahan, tujuan, batasan masalah, metodologi, sistematika penulisan serta relevansi pada tugas akhir ini.

Bab II: Gangguan Sistem Tenaga Listrik dan Arc Flash

Pada bab ini akan dibahas tentang teori-teori penunjang tentang gangguan pada sistem tenaga listrik, koordinasi proteksi, fenomena arc flash, kategori energi arc flash dan Personal Protective Equipment (PPE)

Bab III: Sistem kelistrikan PT. Pupuk Sriwidjaja Palembang (Pusri) IB

Pada bab ini akan dibahas terkait data-data kondisi kelistrikan yang ada pada PT. Pupuk Sriwidjaja Palembang (Pusri) IB.

Bab IV: Koornasi Proteksi dan Analisis Energi Arc Flash

Pada bab ini berisi hasil simulasi dan perhitungan yang telah dilakukan. Dituangkan juga perbandingan energi arc flash sebelum dan setelah *Resetting* koordinasi proteksi serta penentuan Personal Protective Equipment (PPE)

Bab V: Kesimpulan

Pada bab ini berisi kesimpulan dan beberapa saran terkait studi kasus yang telah dilakukan.

1.7 Relevansi

Hasil dari pengerjaan Tugas Akhir ini diharapkan dapat memberikan manfaat, yaitu:

1. Dapat menjadi referensi dan rekomendasi untuk PT. Pupuk Sriwidjaja Palembang (Pusri) dalam permasalahan keamanan sistem kelistrikan.
2. Dapat menjadi pedoman bagi pekerja PT. Pupuk Sriwidjaja Palembang (Pusri) IB yang sedang beraktivitas di daerah bahaya *arc flash*.
3. Dapat menjadi referensi bagi mahasiswa yang akan mengerjakan Tugas Akhir dengan permasalahan yang serupa

BAB 2

GANGGUAN SISTEM TENAGA LISTRIK DAN *ARC FLASH*

2.1 Proteksi Sistem Tenaga Listrik

Sistem proteksi pada suatu sistem kelistrikan memiliki peran penting sebagai pengaman peralatan dan sistem kelistrikan secara menyeluruh. Ketika terjadi gangguan pada suatu titik rele proteksi harus segera mengisolir daerah gangguan dengan memerintahkan *Circuit Breaker* (CB) untuk *open* sehingga kontinuitas penyaluran daya diluar daerah gangguan tetap terjaga dan kerusakan peralatan dapat dihindari [1].

Koordinasi proteksi pada suatu sistem kelistrikan harus didesain sedemikian rupa agar setiap rele pengaman bekerja dengan baik dan tertib. Zona rele pada koordinasi proteksi dibagi menjadi zona primer dan zona *back up*. Rele yang terletak pada zona primer merupakan rele yang paling dekat dengan titik gangguan dan harus bekerja sesegera mungkin saat gangguan terjadi. Rele pada zona *back up* adalah rele yang bekerja ketika rele primer gagal mengisolir gangguan. Terdapat jeda waktu setelah rele primer gagal bekerja yang disebut dengan *time delay*.

2.2 Gangguan Sistem Tenaga Listrik

Ketika gangguan terjadi, arus akan mengalir dari peralatan seperti generator dan motor ke titik gangguan (disebut dengan arus kontribusi). Arus ini memiliki nominal yang jauh lebih besar dari arus nominal *rating* peralatan. Arus yang terlalu besar mengalir pada kabel dan peralatan ini tentunya akan mengakibatkan kenaikan temperatur yang signifikan sehingga dapat menyebabkan kerusakan pada peralatan hingga kebakaran.

2.3 Gangguan Beban Lebih

Gangguan beban lebih merupakan gangguan yang terjadi ketika arus yang mengalir ke suatu peralatan melebihi batas arus nominal yang diizinkan. Gangguan ini disebabkan oleh pengoperasian peralatan yang melebihi *rating*-nya dan ketika terjadi kegagalan isolasi pada peralatan tersebut. Gangguan ini harus segera diamankan untuk menghindari kerusakan peralatan tersebut.

2.4 Gangguan Hubung Singkat

Gangguan hubung singkat adalah gangguan yang terjadi ketika terjadinya hubungan antara fasa dengan fasa maupun fasa dengan tanah (*ground*). Gangguan ini menyebabkan aliran arus yang sangat besar menuju titik terjadinya hubung singkat. Gangguan hubung singkat dibagi menjadi dua yaitu gangguan hubung singkat simetri dan gangguan hubung singkat tidak simetri (asimetri).

Gangguan yang termasuk dalam hubung singkat simetri adalah gangguan hubung singkat tiga fasa (L-L-L) dan hubung singkat tiga fasa ke tanah (L-L-L-G). Saat terjadi gangguan simetri, tegangan pada bus atau titik terjadi gangguan akan bernilai 0 dan arus yang mengalir ke titik gangguan sangat besar.

Sedangkan gangguan yang termasuk dalam hubung singkat tak simetri adalah hubung singkat dua fasa (L-L), dua fasa ke tanah (L-L-G), dan satu fasa ke tanah (L-G). Gangguan ini mengakibatkan arus yang mengalir pada fasa yang terganggu jauh diatas nominal dan juga dapat mengakibatkan kenaikan tegangan pada fasa yang tidak terganggu. Gangguan ini merupakan gangguan yang umum terjadi.

2.5 Rele Arus Lebih (*Over Current Relay*)

Rele arus lebih berfungsi untuk mendeteksi gangguan beban lebih maupun gangguan hubung singkat. Rele ini beroperasi dengan ketentuan berikut [8]:

Ketika:	$I_f > I_p$	rele bekerja	(trip)
	$I_f < I_p$	rele tidak bekerja	(blok)

Dimana:

I_f = arus gangguan

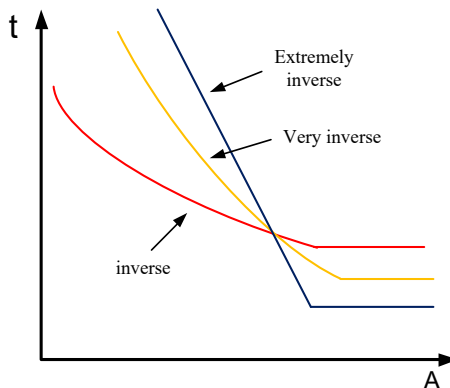
I_p = arus *pick up* atau arus kerja

Ketika I_f yang merupakan arus gangguan mengalir pada sisi primer transformator arus (CT) setelah dikonversikan ke sisi sekunder nilainya lebih besar dari I_p yang arus kerja rele maka rele akan memerintahkan CB untuk *open* (rele bekerja), selain kondisi ini rele tidak akan bekerja. Rele arus lebih dibagi menjadi tiga, yaitu rele arus lebih waktu *inverse*, rele arus lebih waktu instan, dan rele arus lebih waktu tertentu.

Rele Arus Lebih Waktu *Inverse*

Disebut *Inverse* karena rele ini memang memiliki karakteristik waktu operasi yang berbanding terbalik dengan besarnya arus gangguan. Sehingga semakin besar arus gangguan yang terdeteksi semakin cepat waktu operasi rele, begitu juga sebaliknya [9]. Kurva TCC (*time-current characteristic*) adalah kurva yang menunjukkan karakteristik waktu-arus dengan skala dalam *time dial*. Besarnya *time dial* yang ditentukan akan mempengaruhi waktu operasi rele dan kemiringan kurva.

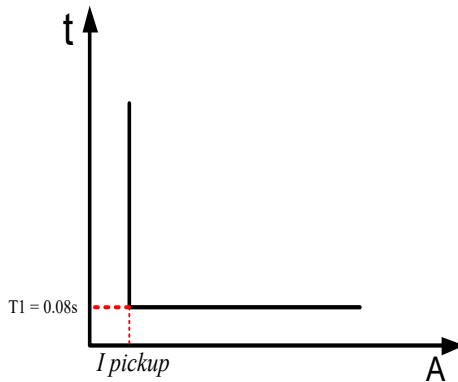
Perlindungan terhadap arus gangguan menggunakan rele arus lebih waktu invers dibagi menjadi beberapa jenis menurut gradien kurvanya. Menurut standar IEC 60255-3 dan *British Standard 142* (BS 142) kurva *inverse* dibagi menjadi *standard inverse*, *very inverse*, dan *extremely inverse* seperti ditunjukkan pada Gambar 2.1. Menurut standar IEEE, terdapat karakteristik kurva invers yang lain yaitu *moderately inverse*, *long time inverse*, dan *short time inverse*.



Gambar 2.1 Karakteristik Beberapa Jenis Rele Waktu *Inverse* Menurut Standar IEC 60255-3 dan *British Standard 142* (BS 142)

2.5.1 Rele Arus Lebih Waktu Instan

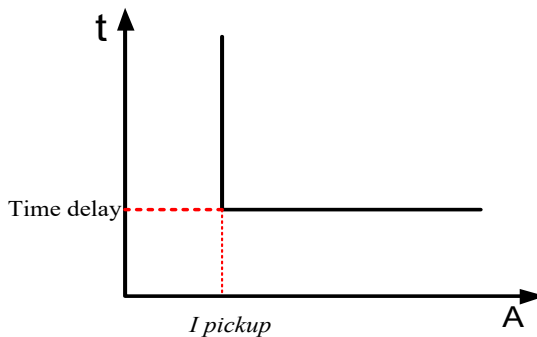
Rele arus lebih waktu instan adalah rele yang bekerja secepat mungkin setelah terdeteksi gangguan. Dengan kata lain rele ini bekerja tanpa penundaan waktu (*time delay*). Pada praktiknya, rele arus lebih waktu instan akan bekerja dengan waktu operasi sebesar 0.08-0.1 detik. Karakteristik rele arus lebih waktu instan ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Instan

2.5.2 Rele Arus Lebih Waktu Tertentu

Rele arus lebih waktu tertentu bekerja seperti rele arus lebih waktu instan tetapi rele ini memiliki waktu operasi (*time delay*) yang dapat diatur sesuai kebutuhan. Karakteristik rele arus lebih waktu tertentu ditunjukkan pada Gambar 2.3 berikut.



Gambar 2.3 Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Tertentu

2.6 Pengaturan Rele Arus Lebih

Setiap rele memiliki pengaturan yang berbeda dengan rele lainnya.

2.6.1 Pengaturan Rele Arus Lebih Waktu *Inverse*

Rele arus lebih waktu *inverse* tidak boleh bekerja ketika kondisi pembebanan maksimum dan hanya bekerja ketika arus yang mengalir melebihi arus pada kondisi tersebut, sehingga pengaturan rele ini harus lebih besar dari arus pada kondisi beban maksimum (*Full Load Ampere*).

Rele arus lebih waktu invers memiliki pengaturan *pick up* dan *time dial*. Pengaturan arus *pick up* pada rele arus lebih ditentukan dengan pemilihan *tap*, yang ditunjukkan pada Persamaan 2.1 berikut [1]:

$$Tap = \frac{I_{set}}{CT_{primary}} \dots \dots \dots (2.1)$$

Dimana I_{set} merupakan arus *pick up* yang ditentukan dalam satuan Ampere. Menurut standar BS 142, batas penentuan I set adalah sebagai berikut:

$$1,05 FLA < I_{set} < 1,3 FLA \dots \dots \dots (2.2)$$

Time dial akan menentukan waktu operasi dari rele arus lebih waktu *inverse*. Penentuan waktu operasi yang dibutuhkan untuk koordinasi terlebih dahulu dilakukan sebelum menentukan batas minimum *time dial* dari masing-masing jenis rele arus lebih waktu *inverse*. Menurut standar IEC 60255-3 dan *British Standard* 142, nilai *time dial* dapat ditentukan dengan menggunakan Persamaan 2.3 sebagai berikut:

$$td = \frac{k \times T}{\beta \times \left[\left(\frac{I}{I_{set}} \right)^\alpha - 1 \right]} \dots \dots \dots (2.3)$$

Dimana:

- td = waktu operasi (detik)
- T = *time dial* (detik)
- I = nilai arus gangguan (Ampere)
- I_{set} = arus *pick up* (Ampere)

- k = koefisien *inverse* 1 (Tabel 2.1)
 α = koefisien *inverse* 2 (Tabel 2.1)
 β = koefisien *inverse* 3 (Tabel 2.1)

Tabel 2.1 Koefisien *Inverse* untuk *Time Dial*

Tipe Kurva	Koefisien		
	k	α	β
<i>Standard Inverse</i>	0,14	0,02	2,970
<i>Very Inverse</i>	13,50	1,00	1,500
<i>Extremely Inverse</i>	80,00	2,00	0,808

2.6.2 Pengaturan Rele Arus Lebih Waktu Instan

Rele arus lebih instan diatur untuk bekerja dalam waktu seketika ketika arus yang mengalir melebihi arus *pick up*. Rele arus lebih waktu instan biasanya digunakan untuk melindungi peralatan atau sistem dari gangguan arus lebih hubung singkat. Dalam menentukan setelan pickup instan ini digunakan arus hubung singkat minimum (I_{scmin}) yaitu arus hubung singkat 2 fasa pada pembangkitan minimum. Nilai *Pick up set point* didapatkan dari Persamaan 2.4 berikut:

$$1,6 \times FLA \leq I_{set} \leq 0,8 I_{scmin} \dots\dots\dots (2.4)$$

2.6.3 Koordinasi Waktu Kerja Rele

Rele pengaman primer dan rele pengaman *backup* tidak boleh bekerja secara bersamaan oleh karena itu dibutuhkan pengaturan *time delay* antara kedua rele tersebut. Pengaturan *Time delay* ini biasa disebut dengan *setting* kelambatan waktu (Δt) atau *grading time*. Menurut standard IEEE 242-2001, didapatkan nilai *time delay* sebagai berikut [1]:

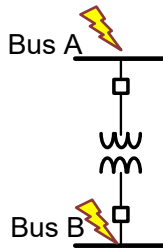
Waktu buka *Circuit Breaker*: 0,06 – 0,1 detik (3-5 *cycle*)

Overtravel rele : 0,1 detik

Faktor keamanan : 0,12 – 0,22 detik

Apabila menggunakan rele digital berbasis *microprocessor*, maka nilai dari *overtravel* rele dapat diabaikan.

Sebagai pertimbangan khusus bagi pengaman *feeder* yang dipisahkan oleh transformator, koordinasi pengaman dibedakan menjadi dua daerah, yakni sisi primer dan daerah sisi sekunder seperti ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Rele Arus Lebih Pengaman Transformator

Dimana $I_{sc \max \text{ bus B}}$ merupakan arus hubung singkat tiga phasa maksimum pada bus B, sedangkan $I_{sc \min, A}$ adalah arus hubung singkat minimum pada titik A.

Ketika $I_{sc \max \text{ bus B}} < 0.8 I_{sc \min, A}$, maka pengaturan I_{set} dapat menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$I_{sc \max \text{ bus B}} \leq I_{set} \leq 0.8 I_{sc \min, A} \dots\dots\dots (2.5)$$

Pengaturan *time delay* rele sisi A pada kondisi seperti ini dapat diatur kembali seperti rele pengaman utama (umumnya 0.1s).

Ketika $I_{sc \max \text{ bus B}} > 0.8 I_{sc \min, A}$, maka pengaturan I_{set} dapat menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$I_{set} \leq 0.8 I_{sc \min, A} \dots\dots\dots (2.6)$$

Pengaturan *time delay* rele sisi A pada kondisi seperti ini diatur menggunakan dengan *grading time* seperti yang telah dijelaskan sebelumnya.

2.7 Pengertian Arc Flash

Arc flash atau busur api adalah kondisi berbahaya yang terkait dengan pelepasan energi yang disebabkan oleh busur api listrik [6]. Saat terjadi *arc flash* arus listrik melewati udara dari fasa ke fasa atau dari fasa ke tanah, suhu udara yang dilewati arus tersebut dapat mencapai 35000°F. *Arc fault* merupakan arus yang mengalir melalui udara diantara konduktor, sedangkan *bolted fault* menggunakan konduktor sebagai tempat mengalirnya.

Terjadinya busur api ini juga diikuti oleh kilatan cahaya yang dapat mengganggu penglihatan dan bahkan juga dapat merusak mata seseorang. Selain itu, busur api juga dapat menghasilkan ledakan yang

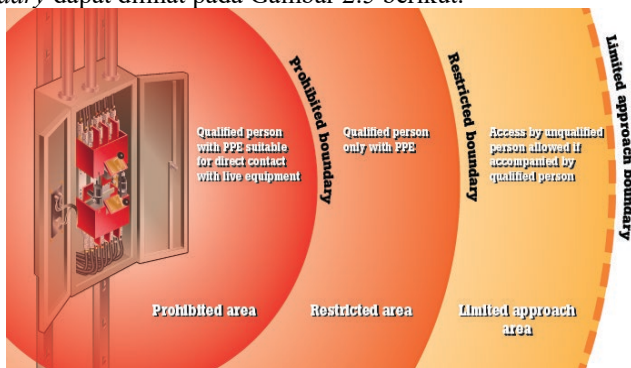
sangat keras serta dapat menyebabkan luka bakar bagi pekerja yang terpapar didaerah kejadian [3].

Ada beberapa hal yang menyebabkan terjadinya *arc flash*, diantaranya debu, pengaratn, binatang, *spark discharge* dari sentuhan/ peralatan yang terjatuh, kegagalan isolasi dari peralatan, kegagalan kerja peralatan pengamanan.

Besar energi yang dihasilkan *arc flash* dipengaruhi beberapa hal, diantaranya adalah besar level tegangan, jarak antar konduktor, dan juga waktu kerja rele untuk mengisolasi gangguan yang terjadi.

2.8 Flash Protection Boundary

Flash protection boundary atau batas jarak perlindungan dari *arc flash* merupakan sebuah pendekatan mengenai batas dimana seseorang akan menderita luka bakar tingkat dua jika seseorang terkena busur api. Digambarkan seperti bola yang memiliki lapisan-lapisan dimana ketika seseorang berada pada pusat bola tersebut maka dia akan terpapar busur api dan menderita luka bakar tingkat dua. Ilustrasi dari *Flash Protection Boundary* dapat dilihat pada Gambar 2.5 berikut.



Gambar 2.5 *Flash Protection Boundary*

Penjelasan lapisan-lapisan *flash protection boundary* [6]:

- *Limited approach boundary*: batas pendekatan dalam jarak dari bagian bertegangan peralatan yang mengalami *arc flash* dimana bahaya sengatan listrik ada. Untuk melewati batas ini seseorang yang tidak terqualifikasi harus didampingi oleh orang yang terqualifikasi.

- *Restricted approach boundary*: batas pendekatan dalam jarak dari bagian bertegangan peralatan yang mengalami *arc flash* dimana terdapat peningkatan risiko tersengat listrik yang disebabkan oleh busur listrik ditambah dengan gerakan-gerakan yang tidak disengaja oleh orang yang bekerja di daerah ini. Hanya orang yang sudah terqualifikasi dan mengenakan *Personal Protective Equipment* (PPE) yang dapat melewati batas ini
- *Prohibited approach boundary*: batas pendekatan dalam jarak dari bagian bertegangan peralatan yang mengalami *arc flash* dimana segala aktivitas di daerah ini dianggap sama dengan membuat kontak langsung dengan bagian bertegangan tersebut. Hanya orang yang sudah terqualifikasi dan mengenakan *Personal Protective Equipment* (PPE) yang sesuai untuk melakukan kontak langsung yang dapat melewati batas ini.

2.9 Perhitungan Energi Busur Api Menggunakan Standar IEEE 1584 – 2002

Dalam mencari nilai dari energi busur api, hal pertama yang harus dilakukan adalah mencari dulu nilai dari arus *arcing fault*. Persamaan untuk menghitung arus arcing fault terbagi menjadi 2 bagian. Yang pertama untuk level tegangan kurang dari 1 kV dan yang kedua untuk level tegangan 1 kV – 15 kV.

Persamaan *arcing fault* untuk level tegangan kurang dari 1 kV dapat dilihat pada Persamaan 2.5 berikut [2].

$$\lg I_a = K + 0,662 \lg I_{bf} + 0,0966 V + 0,000526 G + 0,5588 V(\lg I_{bf}) - 0,00304 G (\lg I_{bf}) \dots\dots\dots(2.7)$$

Sementara untuk level tegangan 1 kV – 15 kV, persamaan arus arcing fault dapat dilihat pada Persamaan 2.6 berikut.

$$\lg I_a = 0,00402 + 0,983 \lg I_{bf} \dots\dots\dots(2.8)$$

Persamaan dari I_a dapat dilihat pada Persamaan 2.7 berikut.

$$I_a = 10^{\lg I_a} \dots\dots\dots(2.9)$$

Dimana:

$lg = \log_{10}$

I_a = arus *arcing* (kA)

K = konstanta

untuk konfigurasi terbuka = -0,153

untuk konfigurasi box = -0,097

$lg I_{bf}$ = *bolted fault current* pada gangguan tiga fasa
(symmetrical RMS) (kA)

V = tegangan sistem (kV)

G = jarak celah antar konduktor (mm)

Selanjutnya setelah mendapatkan nilai *arcing current*, dapat dihitung nilai *incident energy*. Untuk menghitung nilai insiden energi dapat menggunakan Persamaan 2.8 berikut berdasarkan data *normalized* untuk waktu *arcing* 0.2 detik dan jarak dari titik *arcing* ke pekerja sejauh 610 mm.

$$lg E_n = K1 + K2 + 1,081 lg I_a + 0,0011 G \dots\dots\dots(2.10)$$

Dimana:

E_n = energi *normalized* (J/cm²)

$K1$ = konstanta 1

untuk konfigurasi terbuka = -0,792

untuk konfigurasi box = -0,555

$K2$ = konstanta 2

untuk sistem *ungrounded* dan *high-resistance grounded* = 0

untuk sistem *grounded* = -0,113

Setelah didapat nilai E_n , selanjutnya dapat dihitung nilai insiden energi saat terjadi gangguan menggunakan Persamaan 2.9 berikut.

$$E = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right) \dots\dots\dots(2.11)$$

Dimana:

E = Insiden energi (J/cm²)

C_f = faktor pengali

untuk tegangan diatas 1 kV = 1,0

untuk tegangan dibawah 1 kV = 1,5

- t = waktu arcing (detik)
 D = jarak antara titik *arcing* dengan pekerja (mm)
 X = jarak eksponen

Apabila ingin menghitung level insiden energi busur api (E), namun tidak mengetahui nilai pasti untuk jarak celah konduktor, jarak eksponen (x), maupun jarak kerja (D) dapat menggunakan parameter pada Tabel 2.2. sebagai berikut.

Tabel 2.2 Data Paramater-Parameter yang Diperlukan untuk Perhitungan Insiden Energi

Level Tegangan (kV)	Jenis Peralatan	Jarak Celah Antar Konduktor (mm)	Jarak x Faktor	Jarak Kerja (mm)
0,208 – 1	<i>Open Air</i>	10-40	2	-
	<i>Switchgear</i>	32	1,473	455
	<i>MCC and Panels</i>	25	1,641	455
	<i>Cable</i>	13	2	455
> 1 – 5	<i>Open Air</i>	102	2	-
	<i>Switchgear</i>	13-102	0,973	610
	<i>Cable</i>	13	2	455
>5 – 15	<i>Open Air</i>	13-153	2	-
	<i>Switchgear</i>	153	0,973	910
	<i>Cable</i>	13	2	455

Ketika level tegangan berada diatas 15 kV atau jarak bus tidak terdapat di tabel, maka untuk menghitung energi dapat menggunakan metode Lee seperti pada Persamaan 2.10 berikut.

$$E = 2.142 \times 10^6 V I_{bf} \left(\frac{t}{D^2} \right) \dots\dots\dots(2.12)$$

Dimana:

I_{bf} = *boltd fault current*

2.10 Perhitungan *Flash Protection Boundary* Menggunakan Standar IEEE 1584 – 2002

Perhitungan *flash protection boundary* dilakukan dengan Persamaan 2.11 berikut.

$$D_B = \left[4.184 C_f E_n \left(\frac{t}{0.2} \right) \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \dots\dots\dots (2.13)$$

Dimana:

D_B = jarak batas dari titik *arc*ing (mm)

E_B = energi insiden dalam J/cm² pada jarak batasan

Untuk metode Lee, *flash protection boundary* dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.12 berikut.

$$D_B = \sqrt{2,142 \times 10^6 V I_{bf} \left(\frac{t}{E_B} \right)} \dots\dots\dots (2.14)$$

E_B dapat disetting 5.0 J/cm² untuk *bare skin (no hood)* atau rating dari PPE yang diajukan (5.0 J/cm² = 1.2 cal/cm²)

2.11 Pengelompokan Insiden Energi dan Penentuan *Personal Protective Equipment* (PPE) Menggunakan Standar NFPA 70E – 2009

Selanjutnya adalah pengelompokan perlengkapan keselamatan yang harus digunakan pada setiap orang saat memasuki area tersebut. Pengkategorian ini berdasarkan dari besarnya energi yang dihasilkan serta dampak yang ditimbulkan pada tubuh manusia. Hal ini sesuai dengan standar NFPA 70E – 2009. Dimana standar tersebut memberikan kategori insiden energi serta dampak yang akan diterima seseorang bila terpapar busur api. NFPA 70E – 2009 juga menyertakan peralatan yang harus digunakan ketika seseorang berada pada zona yang berpotensi terjadi busur api.

Kategori bahaya ditentukan menggunakan nomor yang mewakili tingkat bahaya berdasarkan nilai insiden energi. Kategori 0 mempresentasikan bahwa daerah tersebut hampir tidak berbahaya atau bahkan tidak berbahaya, sedangkan kategori 4 mempresentasikan daerah

yang sangat berbahaya. Pengkategorian bahaya ditunjukkan oleh Tabel 2.3 berikut [3].

Tabel 2.3 Kategori Bahaya Berdasarkan Insiden Energi

<i>Incident Energy (cal/cm²)</i>		<i>Hazard Risk Category</i>	<i>Class Color</i>
<i>From</i>	<i>To</i>		
0	1.2	0	
1.2	4.0	1	
4.0	8.0	2	
8.0	25.0	3	
25.0	40.0	4	

Personal Protective Equipment (PPE) yang harus digunakan sesuai dengan kategori bahaya ditunjukkan pada Tabel 2.4 berikut.

Tabel 2.4 *Personal Protective Equipment* (PPE)

Kategori Resiko Bahaya	Nilai Insiden Energi (E) maksimal (Cal/cm ²)	Perlengkapan Perlindungan
0	2	Pelindung Mata
		Pelindung Telinga
		Kemeja Lengan Panjang
		Celana Panjang
		Pelindung Mata
1	4	Pelindung Mata
		Pelindung Telinga
		Kemeja Lengan Panjang
		Celana Panjang
2	8	Helm
		Flash Suit Hood
		Pelindung Wajah dan Kepala
		Pakaian Tahan Api
		Pelindung Mata
		Pelindung Telinga

Tabel 2.4 *Personal Protective Equipment (PPE) (Lanjutan)*

Kategori Resiko Bahaya	Nilai Insiden Energi (E) maksimal (Cal/cm ²)	Perlengkapan Perlindungan
3	25	Flash Suit Hood
		Pelindung Wajah dan Kepala
		Pakaian Tahan Api
		Pelindung Mata
		Pelindung Telinga
		Celana Panjang
4	40	Up to 40 cal/cm ² Flash Suit Hood
		Pelindung Wajah dan Kepala
		Pakaian Tahan Api
		Pelindung Mata
		Pelindung Telinga
		Celana Panjang

Gambar 2.6 berikut merupakan tampilan visual dari *Personal Protective Equipment (PPE)* yang dibutuhkan sesuai dengan kategori bahaya.



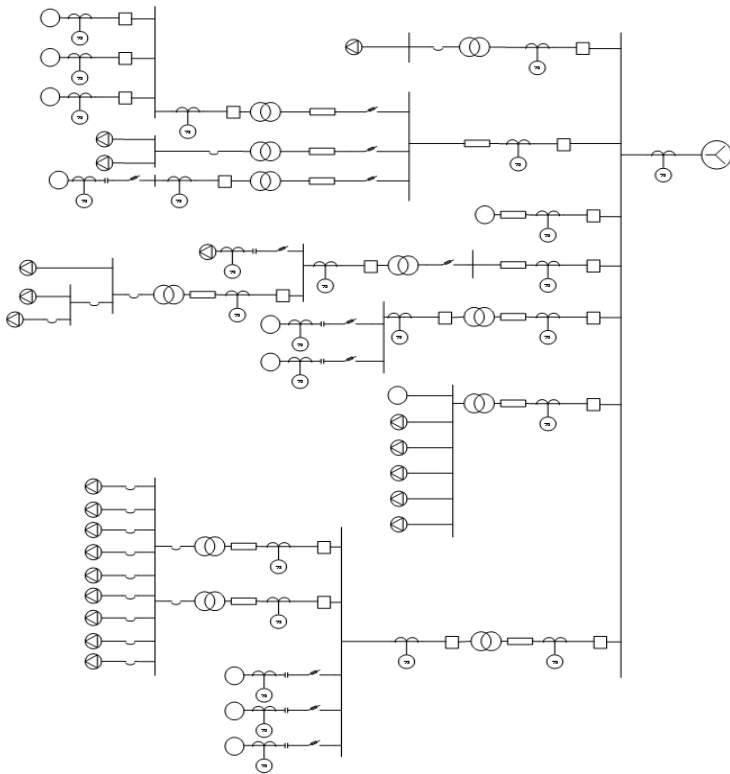
Gambar 2.6 *Personal Protective Equipment (PPE)*

BAB 3

SISTEM KELISTRIKAN PT. PUPUK SRIWIDJAJA PALEMBANG (PUSRI) IB

3.1 Sistem Kelistrikan Pusri IB

PT. Pupuk Sriwidjaja Palembang (Pusri) terdiri dari beberapa pabrik. Setiap pabrik memiliki sistem kelistrikan masing-masing yang saling terhubung dengan pabrik lainnya. Salah satu pabriknya yaitu Pusri IB. Pusri IB didirikan sebagai pengganti dari pabrik Pusri I yang dinyatakan tidak efisien lagi. Sistem kelistrikan Pusri IB dapat dilihat pada Gambar 3.1 berikut ini.



Gambar 3.1 *Single Line Diagram* Pusri IB

3.2 Sistem Pembangkitan Pusri IB

Sistem kelistrikan di Pusri IB di suplai oleh satu unit *swing generator* (STG-1) dan satu unit *voltage-controlled generator* (5006-J). Spesifikasi kedua generator tersebut dapat dilihat pada Tabel 3.2 sebagai berikut.

Tabel 3.1 Data Spesifikasi Generator

Spesifikasi	STG-1	5006-J
Rating (MW)	32	22
Mode Operasi	<i>Swing</i>	<i>Voltage Control</i>
Tegangan (kV)	13,8	13,8
Frekuensi (Hz)	50	50
Kecepatan (rpm)	3000	3000
PF (%)	85	85
FLA (A)	1575	1083
Tipe <i>Exciter</i>	Fixed	ST2
Tipe <i>Governor</i>	ST	GTS

3.3 Data Transformator pada Pusri IB

Sistem kelistrikan pada Pusri IB dibagi atas beberapa nilai level tegangan yang berbeda. Oleh karena itu dibutuhkan transformator untuk merubah level tegangan sesuai kebutuhan dari peralatan listrik yang ada. Berikut ini merupakan data spesifikasi transformator yang ada pada sistem kelistrikan Pusri IB.

Tabel 3.2 Data Spesifikasi Transformator

ID	Tegangan (kV)	Kapasitas (kVA)	%Z	Hubungan
TR#510	13,8 / 0,48	315	4	delta/wye
TR#51A	13,8 / 2,4	2500	5,5	delta/wye
TR#51	13,8 / 0,48	1250	5,5	delta/wye
TR#53	13,8 / 2,4	2000	5,5	delta/wye
TR#54	13,8 / 2,4	2000	5,5	delta/wye
TR#52	13,8 / 0,48	1250	5,5	delta/wye
TR#58	13,8 / 2,4	4000	6	delta/wye
TR#511	2,4 / 0,48	2500	5,5	delta/wye

Tabel 3.2 Data Spesifikasi Transformator (Lanjutan)

ID	Tegangan (kV)	Kapasitas (kVA)	%Z	Hubungan
TR#59	13,8 / 2,4	2500	6	delta/wye
TR#5006	13,8 / 2,4	750	5,63	delta/wye
TR#56	13,8 / 0,48	800	5,5	delta/wye
TR#57	13,8 / 0,48	800	5,5	delta/wye
TR#55	13,8 / 0,48	1250	5,5	delta/wye
TR#512	13,8 / 2,4	2500	6	delta/wye
TR#512A	2,4 / 0,4	500	4	delta/wye
TR#NPK	13,8 / 0,4	2500	5,75	delta/wye
TR#315	13,8 / 0,48	1000	5,75	delta/wye
TR#315A	13,8 / 0,4	500	5,75	delta/wye
TR ML1	13,8 / 2,4	4150	5,2	delta/wye
TR ML2	2,4 / 0,48	2500	6,25	delta/wye
TR ML3	2,4 / 0,48	800	5	delta/wye

3.4 Data Kabel pada Pusri IB

Pada sistem kelistrikan yang ada pada Pusri IB terdapat kabel-kabel yang menjadi penghubung antara suplai dengan beban-beban yang ada. Berikut ini merupakan data spesifikasi kabel yang ada pada Pusri IB.

Tabel 3.3 Data Spesifikasi Kabel

ID	Tegangan (kV)	Panjang (m)	Tipe	Isolasi
CGP1BP1B	15	30	ICEA CU 3/C 300	Karet
CP1BT510	15	15	ICEA CU 3/C 70	Karet
CP1BD5101A	15	15	ICEA CU 3/C 70	Karet
CDS5101ADS51A	15	300	ICEA CU 3/C 70	Karet
CD5101AT51	15	350	ICEA CU 3/C 70	Karet

Tabel 3.3 Data Spesifikasi Kabel (Lanjutan)

ID	Tegangan (kV)	Panjang (m)	Tipe	Isolasi
CMC513	15	300	ICEA CU 3/C 70	Karet
CD5101AT53	15	15	ICEA CU 3/C 70	Karet
CMC53PO1	15	26	ICEA CU 3/C 150	Karet
To SG PIB-4	15	650	ICEA CU 3/C 70	Karet
CP1B5209	15	220	ICEA CU 3/C 70	Karet
CP1BD58	15	277	ICEA CU 3/C 95	Karet
CMC511P01	15	19	ICEA CU 3/C 150	Karet
CM514UPS2	15	300	ICEA CU 3/C 70	Karet
To DS-5101B PIB	15	600	ICEA CU 3/C 95	Karet
CD5101BT54	15	30	ICEA CU 3/C 95	Karet
CT54MC54	15	44	ICEA CU 3/C 150	Karet
CD5101BT52	15	355	ICEA CU 3/C 70	Karet
Cable87*	15	26	ICEA CU 3/C 300	Karet
Cable87	15	26	ICEA CU 3/C 300	Karet
CP1BT59	15	950	ICEA CU 3/C 95	Karet
CP1BD5852	15	15	ICEA CU 3/C 240	Karet

Tabel 3.3 Data Spesifikasi Kabel (Lanjutan)

ID	Tegangan (kV)	Panjang (m)	Tipe	Isolasi
CD5852T5006	15	45	ICEA CU 3/C 70	Karet
CD5852T56	15	800	ICEA CU 3/C 70	Karet
CD5852T57	15	800	ICEA CU 3/C 70	Karet
CD5852T55	15	15	ICEA CU 3/C 70	Karet
CD5852T512	15	15	ICEA CU 3/C 70	Karet
CTR512AP01	15	50	ICEA CU 3/C 95	Karet
CD5852T56	15	800	ICEA CU 3/C 70	Karet
CD5852T57	15	800	ICEA CU 3/C 70	Karet
CD5852T55	15	15	ICEA CU 3/C 70	Karet
CD5852T512	15	15	ICEA CU 3/C 70	Karet
CTR512AP01	15	50	ICEA CU 3/C 95	Karet
CP1BS51A	15	1300	ICEA CU 3/C 300	Karet
Cable81	15	365	ICEA CU 3/C 70	Karet
Cable82	15	175	ICEA CU 3/C 70	Karet
CP1BHOUSINGP3	15	650	ICEA CU 3/C 240	Karet
Cable100	15	220	ICEA CU 3/C 70	Karet

Tabel 3.3 Data Spesifikasi Kabel (Lanjutan)

ID	Tegangan (kV)	Panjang (m)	Tipe	Isolasi
Cable83	15	75	ICEA CU 3/C 185	Karet
Cable84	15	75	ICEA CU 3/C 185	Karet

3.5 Data Beban Motor pada Pusri IB

Pada sistem kelistrikan Pusri IB memiliki beban berupa motor induksi untuk menunjang proses produksi yang ada. Berikut ini merupakan data spesifikasi motor-motor yang ada pada Pusri IB.

Tabel 3.4 Data Spesifikasi Motor

ID	Jenis	Rating Daya	Rating Tegangan (kV)	FLA (A)	PF (%)	Jumlah Motor
4004-J AIR COMP'	Induction	600 kW	2,3	174,6	92,28	1
1-108-JM'	Induction	330 kW	2,3	96,62	92,03	1
1-201-JM'	Induction	160 kW	2,3	47,19	91,73	1
32-5204-UA/AC /AE/A G/AI'	Induction	150 kW	2,3	50,12	81	5
32-5204-UB/UD /UF/U H' (54)	Induction	150 kW	2,3	48,33	84	4
5209-JCM	Induction	1575 kW	13,8	89,3	93,4	1

Tabel 3.4 Data Spesifikasi Motor (Lanjutan)

ID	Jenis	Rating Daya	Rating Tegangan (kV)	FLA (A)	PF (%)	Jumlah Motor
NH3 COMP CO2 PLANT'	Induction	250 HP	2,3	53,05	95	1
5201- J/JA' (pompa sungai)	Induction	300 kW	2,3	87,92	91,99	2
Mtr7	Induction	500 HP	2,3	109	92,08	1
MP-132'	Induction	150 kW	2,4	41,64	91,71	1
MP- 311A'	Induction	220 kW	2,4	60,84	91,87	1
MP- 321A'	Induction	220 kW	2,4	60,84	91,87	1

3.6 Data Beban Statis Pada Pusri IB

Pada sistem kelistrikan Pusri IB juga terdapat beban statis murni sebagai berikut.

Tabel 3.5 Data Beban Statis

ID	Daya (kW)
UPS-1'	80
DP-510*'	100
UPS-2'	80
LUMP#315*'	980
LUMP#315a*'	490

3.7 Data Beban *Lump* pada Pusri IB

Terdapat juga beban yang terdiri dari beban statis dan beban motor. Berikut merupakan data beban-beban lump pada sistem kelistrikan Pusri IB.

Tabel 3.6 Data Beban *Lump*

ID	Daya (kW)	Tegangan (kV)	Beban Statis (%)	Beban Motor (%)
LUMP 510'	318	0,48	90	10
LUMP 51'	571	0,44	13	87
LUMP 513'	135	0,48	40	60
LUMP 52'	619	0,44	4	96
LUMP 58'	2912	2,3	20	80
LUMP 511'	1393	0,44	15	85
LUMP 514'	193	0,48	25	75
LUMP 56	241	0,44	20	80
LUMP 57	330	0,44	20	80
LUMP 55'	870	0,44	20	80
LUMP 515'	20,4	0,48	20	80
SW CNTRL BLD R*	225	0,4	20	80
LUMP 512'	1960	2,3	0	100
DIST PANEL NPK PLANT*	900	0,4	20	80
LUMPPAR DIST*	450	13,8	20	80
LUMP PC*	212	0,46	0	100
LUMPPQA*	360	0,46	20	80
LUMP MCC1*	360	0,46	20	80
LUMP MCC2*	360	0,46	20	80
LUMP MCC3*	360	0,46	20	80
LUMP MCC4*	360	0,46	20	80

Tabel 3.6 Data Beban *Lump* (Lanjutan)

ID	Daya (kW)	Tegangan (kV)	Beban Statis (%)	Beban Motor (%)
LUMP MCC5*	360	0,46	20	80
LUMP MCC6*	360	0,46	20	80
LUMP MCC#E*	360	0,46	20	80

3.8 Sistem Pengaman Arus Lebih

Sistem pengaman arus lebih dibutuhkan untuk melindungi sistem dari gangguan arus lebih yang terdapat pada fasa maupun sistem pentanahan agar proses pengolahan dan produksi agar tidak terhenti atau terganggu. Untuk itu peralatan pengaman harus terkoordinasi dengan baik sehingga ketika terjadi gangguan arus lebih peralatan pengaman tersebut dapat mengisolir daerah gangguan secepat mungkin.

Peralatan yang sangat vital untuk mengamankan sistem dari gangguan arus lebih adalah rele arus lebih. Pada Pusri IB, digunakan rele arus lebih dan LVCB dengan produsen (*manufacturer*) berbeda-beda. Berikut merupakan spesifikasi peralatan pengaman pada kondisi *Existing*:

Tabel 3.7 Spesifikasi LVCB 1 pada Kondisi *Existing*

<i>Manufacturer</i>	Siemens
<i>Model</i>	Static Trip III
<i>I_{sensor}</i>	3200 A
<i>LT Pickup</i>	1
<i>LT Band</i>	3,5
<i>ST Pickup</i>	2
<i>ST Band</i>	0,4
<i>I_t</i>	OUT

Tabel 3.8 Spesifikasi Relay 1 pada Kondisi *Existing*

<i>Manufacturer</i>	Basler Electric
<i>Model</i>	BE1-51
<i>Curve Type</i>	E7-BS142 <i>Extremely Inverse</i>
<i>CT Ratio</i>	800:5

Tabel 3.8 Spesifikasi Relay 1 pada Kondisi *Existing* (Lanjutan)

<i>Overcurrent Pickup</i>	3,51
<i>Time Dial</i>	99
<i>Instantaneous Pickup</i>	8,6

Tabel 3.9 Spesifikasi Relay 2 pada Kondisi *Existing*

<i>Manufacturer</i>	Basler Electric
<i>Model</i>	BE1-51
<i>Curve Type</i>	E7-BS142 <i>Extremely Inverse</i>
<i>CT Ratio</i>	800:5
<i>Overcurrent Pickup</i>	5,12
<i>Time Dial</i>	15
<i>Instantaneous Pickup</i>	7,4

Tabel 3.10 Spesifikasi Relay 3 pada Kondisi *Existing*

<i>Manufacturer</i>	Merlin Gerin
<i>Model</i>	Sepam 2000
<i>Curve Type</i>	<i>Very Inverse</i>
<i>CT Ratio</i>	200:5
<i>Overcurrent Pickup</i>	1,15
<i>Time Dial</i>	12,5
<i>Instantaneous Pickup</i>	19,3
<i>Time Delay</i>	0,7

Tabel 3.11 Spesifikasi Relay 4 pada Kondisi *Existing*

<i>Manufacturer</i>	GE Multilin
<i>Model</i>	IFCV
<i>CT Ratio</i>	2000:5
<i>Overcurrent Pickup</i>	3
<i>Time Dial</i>	3
<i>Instantaneous Pickup</i>	17

Tabel 3.12 Spesifikasi Relay 5 pada Kondisi *Existing*

<i>Manufacturer</i>	Basler Electric
<i>Model</i>	BE1-51

Tabel 3.12 Spesifikasi Relay 5 pada Kondisi *Existing* (Lanjutan)

<i>Curve Type</i>	E7-BS142 <i>Extremely Inverse</i>
<i>CT Ratio</i>	1200:5
<i>Overcurrent Pickup</i>	3,7
<i>Time Dial</i>	70
<i>Instantaneous Pickup</i>	11,4

Tabel 3.13 Spesifikasi Relay 6 pada Kondisi *Existing*

<i>Manufacturer</i>	Basler Electric
<i>Model</i>	BE1-51
<i>Curve Type</i>	E7-BS142 <i>Extremely Inverse</i>
<i>CT Ratio</i>	200:5
<i>Overcurrent Pickup</i>	6
<i>Time Dial</i>	11
<i>Instantaneous Pickup</i>	5,7

Tabel 3.14 Spesifikasi Relay 7 pada Kondisi *Existing*

<i>Manufacturer</i>	GE Multilin
<i>Model</i>	139
<i>CT Ratio</i>	50:5
<i>Type</i>	<i>Run Curve</i>
<i>Thermal Pickup</i>	100%
<i>Curve Number</i>	1
<i>Instantaneous Pickup</i>	10
<i>Time Delay</i>	0,1

Tabel 3.15 Spesifikasi Relay 8 pada Kondisi *Existing*

<i>Manufacturer</i>	ABB
<i>Model</i>	SPAM 150C
<i>Curve Type</i>	<i>Definite Time</i>
<i>CT Ratio</i>	200:5
<i>Overcurrent Pickup</i>	1
<i>Time Dial</i>	2,6
<i>Instantaneous Pickup</i>	6
<i>Time Delay</i>	0,43

Tabel 3.16 Spesifikasi Relay 9 pada Kondisi *Existing*

<i>Manufacturer</i>	ABB
<i>Model</i>	SPAJ 140C
<i>Curve Type</i>	IEC – <i>Normal Inverse</i>
<i>CT Ratio</i>	800:5
<i>Overcurrent Pickup</i>	0,8
<i>Time Dial</i>	0,37
<i>Instantaneous Pickup</i>	1,7
<i>Time Delay</i>	0,49

Tabel 3.17 Spesifikasi Relay 10 pada Kondisi *Existing*

<i>Manufacturer</i>	Basler Electric
<i>Model</i>	BE1-51
<i>Curve Type</i>	E6-BS142 <i>Very Inverse</i>
<i>CT Ratio</i>	300:5
<i>Overcurrent Pickup</i>	5,6
<i>Time Dial</i>	27
<i>Instantaneous Pickup</i>	2,7

Tabel 3.18 Spesifikasi Relay 11 pada Kondisi *Existing*

<i>Manufacturer</i>	ABB
<i>Model</i>	SPAM 150C
<i>Curve Type</i>	<i>Definite Time</i>
<i>CT Ratio</i>	1000:5
<i>Thermal Pickup</i>	0,95
<i>t6x</i>	3,5
<i>Weighting factor p</i>	20
<i>Instantaneous Pickup</i>	4,6
<i>Time Delay</i>	0,1

BAB 4

KOORDINASI PROTEKSI DAN ANALISIS FENOMENA *ARC FLASH*

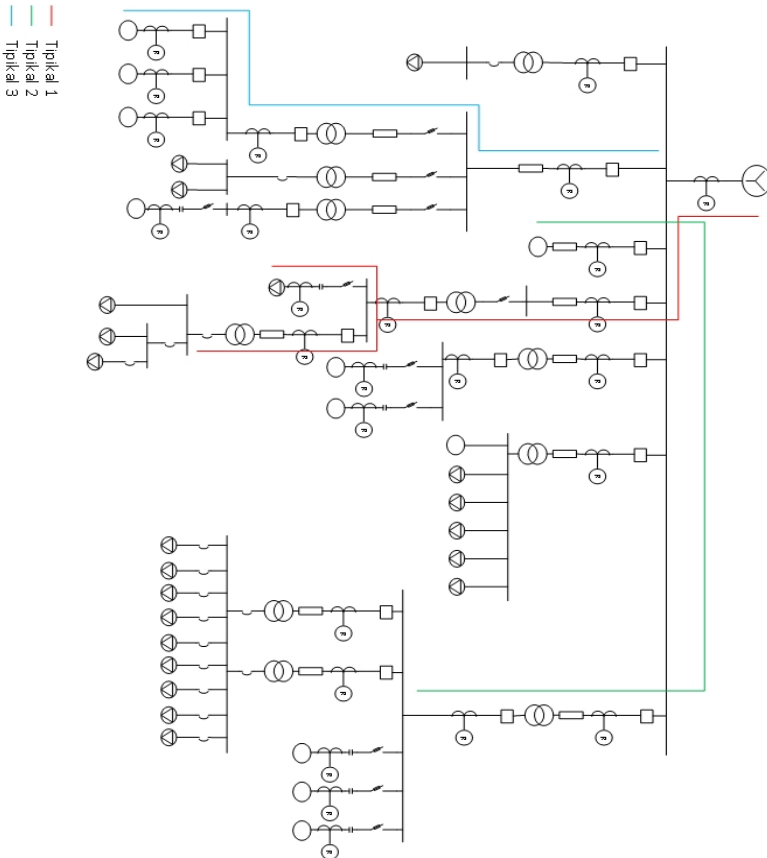
4.1 Pemodelan Sistem Kelistrikan PT. Pupuk Sriwidjaja Palembang (Pusri) IB

Pusri IB merupakan salah satu dari beberapa unit pabrik yang ada pada PT. Pupuk Sriwidjaja Palembang (Pusri). Pusri IB merupakan pabrik yang dibangun sebagai pengganti pabrik Pusri I yang telah dinyatakan tidak efisien lagi. Ruang lingkup Pusri IB mencakup satu unit pabrik amonia berkapasitas 1.350 ton per hari atau 396.000 ton per tahun. Satu unit pabrik urea berkapasitas 1.725 ton per hari atau 570.000 ton per tahun dan satu unit utilitas, *offsite* dan *auxiliary*.

Pemodelan sistem kelistrikan Pusri IB dilakukan dengan pembuatan *single line diagram* (SLD) menggunakan *software* ETAP 12.6. Pembuatan SLD ini dilakukan dengan mengacu pada data spesifikasi peralatan-peralatan yang telah diperoleh. Peralatan-peralatan ini meliputi generator, transformator, *bus*, kabel, *fuse*, dan beban.

Pemodelan sistem kelistrikan ini bertujuan untuk mengetahui kondisi *Existing* dari sistem kelistrikan Pusri IB. Setelah diketahui kondisi *Existing* dilakukan penyetelan ulang (*Resetting*) rele-rele yang belum bekerja dengan maksimal sehingga dapat mengurangi nilai insiden energi dari *arc flash* yang kemudian dilakukan perbandingan dari kedua kondisi tersebut. Setelah itu dilakukan penentuan *Personal Protective Equipment* (PPE) sesuai dengan kategori bahaya yang kemudian dilakukan juga perbandingan antara PPE yang diperlukan pada kondisi *Existing* dan *Resetting*.

4.2 Pemilihan Tipikal Koodinasi Proteksi Pusri IB



Gambar 4.1 Pemilihan Tipikal Sistem Kelistrikan Pusri IB

4.3 Analisis Arus Gangguan Hubung Singkat

Untuk melakukan penyetelan pada rele pengaman terlebih dahulu dilakukan analisis arus gangguan hubung singkat di setiap bus utama pada tipikal yang dipilih. Arus gangguan hubung singkat yang digunakan yaitu arus hubung singkat minimum dan arus hubung singkat maksimum. Nilai arus hubung singkat minimum adalah ketika terjadi gangguan hubung

singkat dua fasa pada saat 30 *cycle*, sedangkan nilai arus hubung singkat maksimum adalah ketika terjadi gangguan tiga fasa pada saat 4 *cycle*.

4.4 Analisis Hubung Singkat Minimum

Untuk melakukan penyetelan pada rele pengaman arus lebih dan *Low Voltage Circuit Breaker* (LVCB) digunakan nilai arus hubung singkat dua fasa pada saat 30 *cycle*. Nilai ini digunakan untuk membuat batasan pada *setting instantaneous pickup* rele arus lebih dan juga *short time pickup* dan *long time pickup* pada LVCB. Menggunakan *software* ETAP 12.6 dilakukan simulasi terjadinya hubung singkat minimum pada setiap *bus* utama yang terdapat pada setiap tipikal. Hasil simulasi ditunjukkan pada Tabel 4.1 berikut.

Tabel 4.1 Data Arus Hubung Singkat Minimum pada *Bus* Utama

No	ID Bus	Tegangan (kV)	Arus hubung singkat (kA)
1	SG-51	13,80	12,82
2	DS-5101A	13,80	12,80
3	DS-58/58A	13,80	12,07
4	MCC#51A	2,40	8,32
5	MCC#58	2,40	11,57
6	MCC#ML1	2,40	13,44
7	MCC#511	0,48	24,72

4.5 Analisis Hubung Singkat Maksimum

Pada proses *setting* rele arus lebih tugas, dibutuhkan data arus gangguan hubung singkat maksimum 4 *cycle* untuk keperluan perhitungan *time dial* kurva invers dan *setting* rele pengaman transformator. Data arus gangguan hubung singkat maksimum 4 *cycle* dipelukan untuk *setting* rele arus lebih yang bekerja pada waktu mendekati 4 *cycle* (0.08s). Pada fase 4 *cycle* sampai dengan 30 *cycle* (fase transien), motor masih memberikan arus kontribusi ke titik terjadinya gangguan. Menggunakan *software* ETAP 12.6 dilakukan simulasi terjadinya hubung singkat maksimum pada setiap *bus* utama yang terdapat pada setiap tipikal. Hasil simulasi ditunjukkan pada Tabel 4.2 berikut.

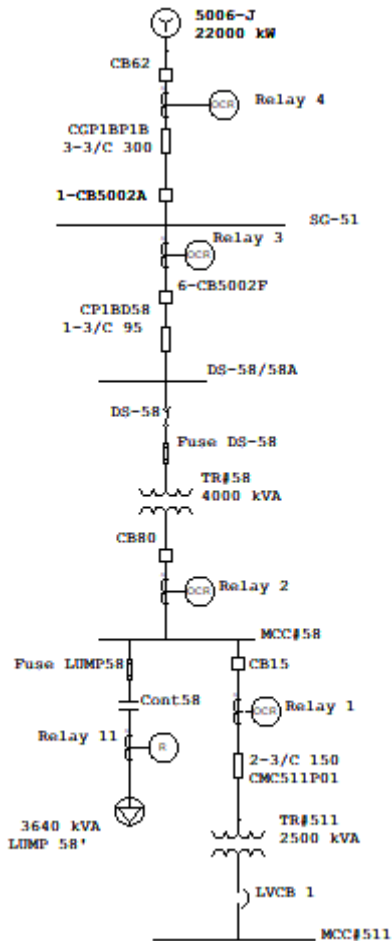
Tabel 4.2 Data Arus Hubung Singkat Maksimum pada *Bus* Utama

No	ID Bus	Tegangan (kV)	Arus hubung singkat (kA)
1	SG-51	13,80	19,33
2	DS-5101A	13,80	19,30
3	DS-58/58A	13,80	17,93
4	MCC#51A	2,40	10,58
5	MCC#58	2,40	17,74
6	MCC#ML1	2,40	17,97
7	MCC#511	0,48	35,98

4.6 Koordinasi Rele Arus Lebih

Untuk menciptakan koordinasi yang baik antara rele primer dan rele *backup* penyetelan waktu operasi harus diperhatikan. Menurut standar IEEE 242, *grading time* untuk rele digital adalah 0,2 sampai 0,3 detik. Arus starting motor dan generator serta arus *inrush* transformator juga harus diperhatikan agar ketika peralatan-peralatan tersebut melakukan *starting* atau *energized* rele tidak mendeteksi hal tersebut sebagai gangguan. Pada sistem kelistrikan Pusri IB banyak menggunakan rele arus lebih BE1-51 yang dimanufaktur oleh Basler Electric. Rele ini memiliki karakteristik *instantaneous* yang unik. Pada rele ini untuk penyetelan *instantaneous time delay*-nya tidak dapat disetel, sehingga untuk melakukan koordinasi waktu dengan rele lainnya hanya dengan mengatur besar *pickup instantaneous*-nya dan *time dial* saja.

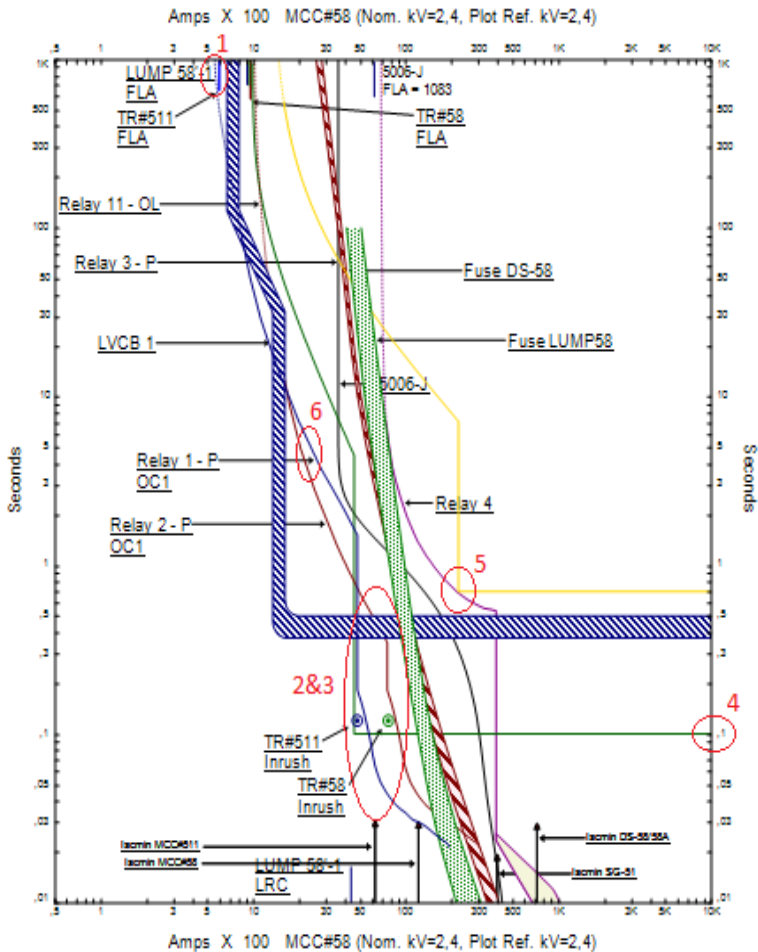
4.6.1 Koordinasi Rele Arus Lebih Tipikal 1



Gambar 4.2 SLD Tipikal 1

Tipikal 1 merupakan tipikal dengan saluran terjauh dari sumber dengan mengacu pada jumlah bus yang di lewati. Terdapat tiga level tegangan pada tipikal ini yaitu 13,8 kV, 2,4 kV, dan 0,48 kV. Tipikal ini

dimulai dari bus MCC#511 menuju generator 5006-J melewati transformator TR#511 dan TR#58. Pada Tipikal 1 ini terdapat empat rele yang akan dikoordinasikan yaitu Relay 1, Relay 2, Relay 3, dan Relay 4 serta satu LVCB yaitu LVCB 1. Gambar 4.3 berikut merupakan kondisi *Existing* koordinasi proteksi pada Tipikal 1.



Gambar 4.3 Time Current Curve Kondisi *Existing* Tipikal 1

Berdasarkan Gambar 4.3 dapat diketahui bahwa terdapat *setting* peralatan dan koordinasi antara peralatan yang kurang baik pada Tipikal 1. Kesalahan tersebut terdapat pada area yang telah diberi tanda lingkaran merah pada Gambar 4.3. Berikut merupakan penjelasan kesalahan penyetelan pada Tipikal 1:

1. Terdapat kesalahan penyetelan *overcurrent pickup* pada Relay 1. Nilai *overcurrent pickup* Relay 1 lebih kecil daripada FLA transformator TR#511, sehingga ketika transformator sedang bekerja dalam kondisi beban penuh Relay 1 akan memerintahkan CB15 untuk *open*. Hal tersebut bukanlah merupakan sebuah gangguan yang harus diamankan, sehingga butuh dilakukan penyetelan ulang untuk Relay 1.
2. Melihat posisi kurva *instantaneous* Relay 1 dan Relay 2 ketika terjadi hubung singkat pada sisi primer transformator TR#511 dengan arus yang cukup besar, Relay 1 dan Relay 2 akan bekerja memerintahkan HVCB untuk *open* dalam waktu yang hampir bersamaan. Hal ini tidak sesuai dengan standar IEEE 242-2001 sehingga dibutuhkan penyetelan ulang pada kedua rele tersebut.
3. Melihat posisi kurva *short time* dari LVCB 1 ketika terjadi hubung singkat pada bus MCC#511, Relay 1 dan 2 akan *overlapping* terhadap LVCB 1. Hal ini merupakan kesalahan koordinasi yang harus diperbaiki, dimana ketika terjadi hubung singkat pada bus MCC#511 peralatan pengaman yang seharusnya bekerja pertama kali adalah LVCB 1 dan Relay 1 sebagai *backup*-nya.
4. Ketika terjadi gangguan hubung singkat pada sisi LUMP 58', Relay 11 akan memerintahkan kontaktor Cont58 untuk *open* pada waktu 0,1 detik. Hal ini berbahaya karena kontaktor bukan merupakan alat pemutus untuk gangguan hubung singkat melainkan untuk gangguan beban lebih sehingga dibutuhkan penyetelan ulang waktu operasi Relay 11.
5. Melihat posisi kurva Relay 3, ketika terjadi gangguan hubung singkat Relay 4 akan *overlapping* terhadap Relay 3. Hal ini disebabkan *setting instantaneous pickup* dan *time delay* Relay 3 terlalu besar sehingga perlu dilakukan penyetelan ulang.
6. Melihat posisi kurva *inverse* dari Relay 1 dan Relay 2, ketika terjadi gangguan beban lebih Relay 2 akan *overlapping* terhadap Relay 1. Hal ini merupakan sebuah kesalahan koordinasi melihat Relay 2 terletak pada *upstream* saluran dibandingkan dengan Relay 1 sehingga perlu dilakukan penyetelan ulang.

Sebelum melakukan penyetelan ulang peralatan-peralatan pengaman pada Tipikal 1, perlu dilakukan perhitungan manual terlebih dahulu. Berikut merupakan perhitungan manual untuk *setting* peralatan pada Tipikal 1:

Setting LVCB 1

Tabel 4.3 Spesifikasi dan Data Penunjang *Setting* LVCB 1

<i>Manufacturer</i>	Siemens
<i>Model</i>	Static Trip III
FLA Sekunder TR#511	3007 A
$I_{sc}min$ Bus MCC#511	24720 A
I_{sensor}	3200 A

Long Time Pickup

$$\begin{array}{rcl}
 1,05 \times FLA & \leq I_{set} \leq & 0,8 \times I_{sc}min \\
 1,05 \times 3007 & \leq I_{set} \leq & 0,8 \times 24720 \\
 3157,35 & \leq I_{set} \leq & 19776
 \end{array}$$

Dipilih $I_{set} = 3200$ A

$$LT Pickup = \frac{I_{set}}{I_{sensor}} = \frac{3200}{3200} = 1$$

Dipilih $LT Band = 3,5$

Short Time Pickup

$$\begin{array}{rcl}
 I_{set} & \leq & 0,8 \times I_{sc}min \\
 I_{set} & \leq & 0,8 \times 24720 \\
 I_{set} & \leq & 19776
 \end{array}$$

Dipilih $I_{set} = 6400$ A

$$ST Pickup = \frac{I_{set}ST}{I_{set}LT} = \frac{6400}{3200} = 2$$

Dipilih $ST Band = 0,3$

Instantaneous = Disabled

Setting Relay 1

Tabel 4.4 Spesifikasi dan Data Penunjang *Setting Relay 1*

<i>Manufacturer</i>	Basler Electric
<i>Model</i>	BE1-51
<i>Curve Type</i>	E7-BS142 <i>Extremely Inverse</i>
<i>CT Ratio</i>	800:5
FLA Primer TR#511	601,4 A
$I_{sc}min$ Bus MCC#58	11570 A
$I_{sc}max$ bus MCC#58	17740 A
$I_{sc}max$ bus MCC#511	35980 A
Konversi $I_{sc}max$ Bus MCC#511 ke Level Tegangan 2,4 kV	$\frac{480}{2400} \times 35980 = 7196 A$

Relay 1 merupakan rele pelindung transformator sehingga ketika memenuhi kondisi $I_{sc} max sekunder < 0,8 \times I_{sc} min primer$ waktu operasi Relay 1 boleh kembali ke 0,1 detik.

Time Overcurrent Pickup

$$\begin{aligned}
 1,05 \times FLA &\leq I_{set} \leq 1,4 \times FLA \\
 1,05 \times 601,4 &\leq I_{set} \leq 1,4 \times 601,4 \\
 631,47 &\leq I_{set} \leq 841,96 \\
 \frac{631,47}{800/5} I_n &\leq Tap \leq \frac{841,96}{800/5} I_n \\
 3,95 I_n &\leq Tap \leq 5,26 I_n
 \end{aligned}$$

Dipilih $Tap = 5,26$ (range: 0,5 – 12 step: 0,01)

$$I_{set} = 841,6 A$$

Time Dial

Dipilih waktu operasi (t) = 0,25 detik

$$\begin{aligned}
 t_d &= \frac{k}{\left(\frac{I}{I_{set}}\right)^\alpha - 1} \times \frac{T}{\beta} \\
 t_d &= \frac{80}{\left(\frac{I_{sc}max}{I_{set}}\right)^2 - 1} \times \frac{T}{0,808}
 \end{aligned}$$

$$T = \frac{t_d \times 0,808 \times \left[\left(\frac{I_{scmax}}{I_{set}} \right)^2 - 1 \right]}{80}$$

$$T = \frac{0,25 \times 0,808 \times \left[\left(\frac{17740}{841,6} \right)^2 - 1 \right]}{80}$$

$$T = 1,12$$

Dipilih *time dial* = 28 (range: 0 – 99 step: 1,0)

Instantaneous Pickup

Relay 1 adalah rele pelindung transformator, oleh Karena itu dalam proses *setting* kurva *instantaneous* harus memperhatikan kondisi sesuai yang telah dipaparkan pada bab 2. Pada bagian sebelumnya, diperoleh data:

Iscmin 30 cycle bus MCC#58 = 11570 A (2,4kV)

Iscmax 4 cycle bus MCC#511 = 7196 A (2,4 kV)

Karena dari data tersebut didapatkan kondisi:

$I_{sc} \text{ max 4 cycle sisi sekunder} < 0,8 \times I_{sc} \text{ min 30 cycle sisi primer}$
Maka:

$$I_{sc} \text{ max sekunder} \leq I_{set} \leq 0,8 \times I_{sc} \text{ min primer}$$

$$7196 \leq I_{set} \leq 0,8 \times 11570$$

$$7196 \leq I_{set} \leq 9256$$

$$\frac{7196}{\left(\frac{800}{5} \right) \times \text{TOCpickup}} \text{In} \leq \text{Tap} \leq \frac{9256}{\left(\frac{800}{5} \right) \times \text{TOCpickup}} \text{In}$$

$$\frac{7196}{\left(\frac{800}{5} \right) \times 5,26} \text{In} \leq \text{Tap} \leq \frac{9256}{\left(\frac{800}{5} \right) \times 5,26} \text{In}$$

$$8,55 \text{ In} \leq \text{Tap} \leq 10,99 \text{ In}$$

Dipilih tap = 9,2 (range: 1-40 step: 0,1)

Iset = 7743 A

Setting Relay 2

Tabel 4.5 Spesifikasi dan Data Penunjang *Setting* Relay 2

<i>Manufacturer</i>	Basler Electric
<i>Model</i>	BE1-51
<i>Curve Type</i>	E7-BS142 <i>Extremely Inverse</i>
<i>CT Ratio</i>	1000:5
FLA Sekunder TR#58	962,3 A

Tabel 4.5 Spesifikasi dan Data Penunjang *Setting* Relay 2 (Lanjutan)

$I_{sc\min}$ Bus MCC#58	11570 A
$I_{sc\max}$ Bus MCC#58	17740 A

Time Overcurrent Pickup

$$\begin{aligned}
1,05 \times FLA &\leq I_{set} \leq 1,4 \times FLA \\
1,05 \times 962,3 &\leq I_{set} \leq 1,4 \times 962,3 \\
1010,42 &\leq I_{set} \leq 1347,22 \\
\frac{1010,42}{1000/5} I_n &\leq Tap \leq \frac{1347,22}{1000/5} I_n \\
5,06 I_n &\leq Tap \leq 6,73 I_n
\end{aligned}$$

Dipilih $Tap = 5,06$ (range: 0,5 – 12 step: 0,01)

$I_{set} = 1012 \text{ A}$

Time Dial

Dipilih waktu operasi (t) = 0,45 detik

$$\begin{aligned}
t_d &= \frac{k}{\left(\frac{I}{I_s}\right)^\alpha - 1} \times \frac{T}{\beta} \\
t_d &= \frac{80}{\left(\frac{I_{sc\max}}{I_{set}}\right)^2 - 1} \times \frac{T}{0,808} \\
T &= \frac{t_d \times 0,808 \times \left[\left(\frac{I_{sc\max}}{I_{set}}\right)^2 - 1\right]}{80} \\
T &= \frac{0,45 \times 0,808 \times \left[\left(\frac{17740}{1012}\right)^2 - 1\right]}{80} \\
T &= 1,4
\end{aligned}$$

Dipilih $time \text{ dial} = 54$ (range: 0 – 99 step: 1,0)

Instantaneous = Disabled

Setting Relay 3**Tabel 4.6** Spesifikasi dan Data Penunjang *Setting* Relay 3

<i>Manufacturer</i>	Merlin Gerin
<i>Model</i>	Sepam 2000
<i>Curve Type</i>	Very Inverse

Tabel 4.6 Spesifikasi dan Data Penunjang *Setting Relay 3* (Lanjutan)

CT Ratio	200:5
FLA Primer TR#58	167,3 A
$I_{sc\min}$ Bus DS-58/58A	12070 A
$I_{sc\max}$ Bus DS-58/58A	17930 A

Time Overcurrent Pickup

$$\begin{array}{rcl}
1,05 \times FLA & \leq I_{set} \leq & 1,4 \times FLA \\
1,05 \times 167,3 & \leq I_{set} \leq & 1,4 \times 167,3 \\
175,67 & \leq I_{set} \leq & 234,22 \\
\frac{175,67}{200} I_n & \leq Tap \leq & \frac{234,22}{200} I_n \\
0,88 I_n & \leq Tap \leq & 1,17 I_n
\end{array}$$

Dipilih $Tap = 1,15$ (range: 0,3 – 2,4xCTsec step: 0,05)

$I_{set} = 230 \text{ A}$

Time Dial

Dipilih waktu operasi (t) = 0,3 detik

$$\begin{aligned}
t_d &= \frac{k}{\left(\frac{I}{I_s}\right)^\alpha - 1} \times \frac{T}{\beta} \\
t_d &= \frac{13,5}{\left(\frac{I_{sc\max}}{I_{set}}\right) - 1} \times \frac{T}{1,5} \\
T &= \frac{t_d \times 1,5 \times \left[\left(\frac{I_{sc\max}}{I_{set}}\right) - 1\right]}{13,5} \\
T &= \frac{0,3 \times 1,5 \times \left[\left(\frac{17930}{230}\right) - 1\right]}{13,5} \\
T &= 2,57
\end{aligned}$$

Dipilih *time dial* = 2,6 (range: 0,1 – 12,5 step: 0,1)

Instantaneous Pickup

$$\begin{array}{rcl}
1,6 \times FLA & \leq I_{set} \leq & 0,8 \times I_{sc\min} \\
1,6 \times 167,3 & \leq I_{set} \leq & 0,8 \times 12070 \\
267,68 & \leq I_{set} \leq & 9656
\end{array}$$

$$\begin{array}{ccc} \frac{267,68}{200} I_n & \leq Tap \leq & \frac{9656}{200} I_n \\ 1,34 I_n & \leq Tap \leq & 48,28 I_n \end{array}$$

Dipilih $Tap = 24$ (range: 0,3 – 24xCTsec step: 1,0)
 $I_{set} = 4800 A$

Setting Relay 4

Tabel 4.7 Spesifikasi dan Data Penunjang Setting Relay 4

<i>Manufacturer</i>	GE Multilin
<i>Model</i>	IFCV
<i>Curve Type</i>	Inverse (51) (100%)
<i>CT Ratio</i>	2000:5
FLA 5006-J	1083 A
$I_{sc}min$ Bus SG-51	12820 A
$I_{sc}max$ Bus SG-51	19330 A

Time Overcurrent Pickup

$$\begin{array}{ccc} 1,05 \times FLA & \leq I_{set} \leq & 1,4 \times FLA \\ 1,05 \times 1083 & \leq I_{set} \leq & 1,4 \times 1083 \\ 1137,15 & \leq I_{set} \leq & 1516,2 \\ \frac{1137,15}{2000/5} I_n & \leq Tap \leq & \frac{1516,2}{2000/5} I_n \\ 2,85 I_n & \leq Tap \leq & 3,79 I_n \end{array}$$

Dipilih $Tap = 3$ (range: 2 – 16 step: equipment defined)
 $I_{set} = 1200 A$

Time Dial

Dipilih waktu operasi (t) = 0,01 detik

$$\begin{aligned} t_d &= \frac{k}{\left(\frac{I}{I_s}\right)^\alpha - 1} \times \frac{T}{\beta} \\ t_d &= \frac{0,14}{\left(\frac{I_{sc}max}{I_{set}}\right)^{0,02} - 1} \times \frac{T}{2,97} \\ T &= \frac{t_d \times 2,97 \times \left[\left(\frac{I_{sc}max}{I_{set}}\right)^{0,02} - 1\right]}{0,14} \end{aligned}$$

$$T = \frac{0,01 \times 2,97 \times \left[\left(\frac{19330}{1200} \right)^{0,02} - 1 \right]}{0,14}$$

$$T = 0,02$$

$$\text{Dipilih } time \text{ dial} = 3,81 \quad (\text{range: } 1 - 10 \quad \text{step: } 0,01)$$

Instantaneous Pickup

$$1,6 \times FLA \leq I_{set} \leq 0,8 \times I_{sc} min$$

$$1,6 \times 1083 \leq I_{set} \leq 0,8 \times 12820$$

$$1732,8 \leq I_{set} \leq 10256$$

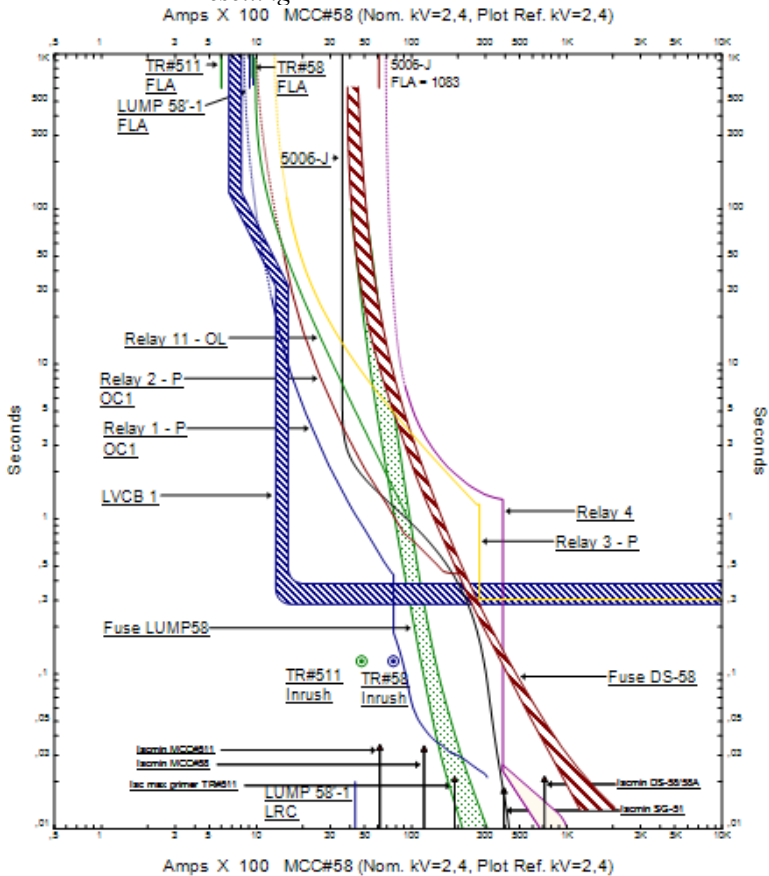
$$\frac{1732,8}{2000/5} I_n \leq Tap \leq \frac{10256}{2000/5} I_n$$

$$4,34 I_n \leq Tap \leq 25,64 I_n$$

$$\text{Dipilih } Tap = 17 \quad (\text{range: } 6 - 30 \quad \text{step: } 1,0)$$

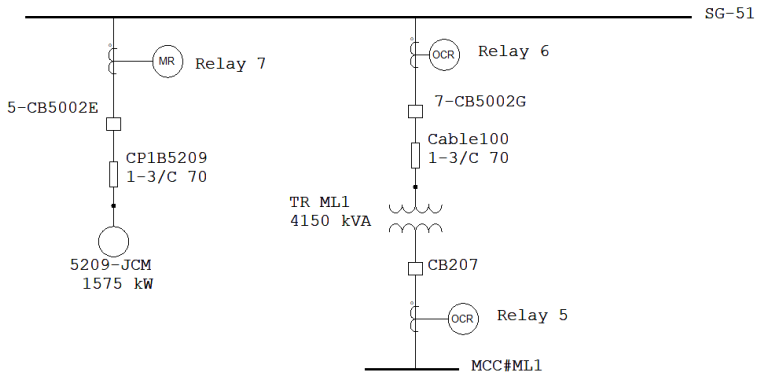
$$I_{set} = 6800 A$$

Gambar 4.4 berikut merupakan *time current curve* Tipikal 1 setelah dilakukan *Resetting*.



Gambar 4.4 Time Current Curve Kondisi Resetting Tipikal 1

4.6.2 Koordinasi Rele Arus Lebih Tipikal 2



Gambar 4.5 SLD Tipikal 2

Tipikal 2 merupakan tipikal dengan beban motor terbesar dan transformator terbesar di sistem. Terdapat dua level tegangan pada tipikal ini yaitu 13,8 kV dan 2,4 kV. Pada tipikal ini terdapat tiga rele yang akan dikoordinasikan yaitu Relay 5, Relay 6, dan Relay 7.

juga lebih kecil daripada arus beban penuh motor 5209-JCM-1 sehingga menyebabkan *mal-trip* ketika motor sedang bekerja pada kondisi beban penuh. Penyetelan *instantaneous* Relay 7 bersifat *fixed* (tidak dapat dirubah) sehingga yang perlu dilakukan penyetelan ulang adalah transformator arus CT3 dan *thermal pickup*-nya.

2. Ketika terjadi gangguan hubung singkat pada *bus* MCC#ML1 Relay 6 akan bekerja lebih dulu daripada Relay 5 dalam waktu yang hampir bersamaan. Dimana seharusnya Relay 6 bekerja sebagai *backup* dari Relay 5 sehingga perlu dilakukan penyetelan ulang pada kedua rele tersebut.
3. Nilai *overcurrent pickup* Relay 5 lebih kecil daripada arus beban penuh transformator TR ML1, sehingga ketika transformator bekerja pada kondisi beban penuh, Relay 5 akan memerintahkan CB207 untuk *open*. Kondisi tersebut bukan merupakan sebuah gangguan yang harus diamankan sehingga perlu dilakukan penyetelan ulang pada Relay 5.

Sebelum melakukan penyetelan ulang peralatan-peralatan pengaman pada Tipikal 2, perlu dilakukan perhitungan manual terlebih dahulu. Berikut merupakan perhitungan manual untuk *setting* peralatan pada Tipikal 2:

Setting Relay 5

Tabel 4.8 Spesifikasi dan Data Penunjang *Setting* Relay 5

<i>Manufacturer</i>	Basler Electric
<i>Model</i>	BE1-51
<i>Curve Type</i>	E7-BS142 <i>Extremely Inverse</i>
<i>CT Ratio</i>	1200:5
FLA Sekunder TR ML1	998,3 A
$I_{sc\ min}$ Bus MCC#ML1	13440 A
$I_{sc\ max}$ Bus MCC#ML1	17970 A

Time Overcurrent Pickup

$$\begin{array}{rcl}
 1,05 \times FLA & \leq I_{set} \leq & 1,4 \times FLA \\
 1,05 \times 998,3 & \leq I_{set} \leq & 1,4 \times 998,3 \\
 1048,22 & \leq I_{set} \leq & 1397,62 \\
 \frac{1048,22}{1200/5} I_n & \leq Tap \leq & \frac{1397,62}{1200/5} I_n
 \end{array}$$

$$4,37 I_n \leq Tap \leq 5,82 I_n$$

Dipilih $Tap = 4,4$ (range: 0,5 – 12 step: 0,01)

$$I_{set} = 1056 A$$

Time Dial

Dipilih waktu operasi (t) = 0,37 detik

$$t_d = \frac{k}{\left(\frac{I}{I_s}\right)^\alpha - 1} \times \frac{T}{\beta}$$

$$t_d = \frac{80}{\left(\frac{I_{scmax}}{I_{set}}\right)^2 - 1} \times \frac{T}{0,808}$$

$$T = \frac{t_d \times 0,808 \times \left[\left(\frac{I_{scmax}}{I_{set}}\right)^2 - 1\right]}{80}$$

$$T = \frac{0,37 \times 0,808 \times \left[\left(\frac{17970}{1056}\right)^2 - 1\right]}{80}$$

$$T = 1,08$$

Dipilih $time\ dial = 44$ (range: 0 – 99 step: 1,0)

Instantaneous = Disabled

Setting Relay 6

Tabel 4.9 Spesifikasi dan Data Penunjang Setting Relay 6

<i>Manufacturer</i>	Basler Electric
<i>Model</i>	BE1-51
<i>Curve Type</i>	E7-BS142 <i>Extremely Inverse</i>
<i>CT Ratio</i>	200:5
FLA Primer TR ML1	173,6 A
I_{scmin} Bus SG-51	12820 A
I_{scmax} Bus SG-51	19330 A
I_{scmax} Bus MCC#ML1	17970 A
Konversi I_{scmax} Bus MCC#ML1 ke Level Tegangan 13,8 kV	$\frac{2400}{13800} \times 17970 = 3125,22 A$

Relay 1 merupakan rele pelindung transformator sehingga ketika memenuhi kondisi $I_{sc} \text{ max sekunder} < 0,8 \times I_{sc} \text{ min primer}$ waktu operasi Relay 1 boleh kembali ke 0,1 detik.

Time Overcurrent Pickup

$$\begin{aligned}
 1,05 \times FLA &\leq I_{set} \leq 1,4 \times FLA \\
 1,05 \times 173,6 &\leq I_{set} \leq 1,4 \times 173,6 \\
 182,28 &\leq I_{set} \leq 243,04 \\
 \frac{182,28}{200/5} I_n &\leq Tap \leq \frac{243,04}{200/5} I_n \\
 4,56 I_n &\leq Tap \leq 6,07 I_n
 \end{aligned}$$

Dipilih $Tap = 6$ (range: 0,5 – 12 step: 0,01)
 $I_{set} = 240 \text{ A}$

Time Dial

Dipilih waktu operasi (t) = 0,5 detik

$$\begin{aligned}
 t_d &= \frac{k}{\left(\frac{I}{I_s}\right)^\alpha - 1} \times \frac{T}{\beta} \\
 t_d &= \frac{80}{\left(\frac{I_{scmax}}{I_{set}}\right)^2 - 1} \times \frac{T}{0,808} \\
 T &= \frac{t_d \times 0,808 \times \left[\left(\frac{I_{scmax}}{I_{set}}\right)^2 - 1\right]}{80} \\
 T &= \frac{0,5 \times 0,808 \times \left[\left(\frac{19330}{240}\right)^2 - 1\right]}{80} \\
 T &= 32,76
 \end{aligned}$$

Dipilih $time \text{ dial} = 46$ (range: 0 – 99 step: 1,0)

Instantaneous = Disabled

Setting Relay 7

Tabel 4.10 Spesifikasi dan Data Penunjang Setting Relay 7

<i>Manufacturer</i>	GE Multilin
<i>Model</i>	139
<i>CT Ratio</i>	100:5

Tabel 4.10 Spesifikasi dan Data Penunjang *Setting* Relay 7 (Lanjutan)

FLA 5209-JCM-1	89,3 A
LRC 5209-JCM-1	580,5 A
$I_{sc}min$ Bus SG-51	12820 A
$I_{sc}max$ Bus SG-51	19330 A

Thermal Pickup

$$\begin{aligned}
 1,05 \times FLA &\leq I_{set} \leq 1,4 \times FLA \\
 1,05 \times 89,3 &\leq I_{set} \leq 1,4 \times 89,3 \\
 93,77 &\leq I_{set} \leq 125,02 \\
 \frac{93,77}{100} \times 100\% I_n &\leq Tap \leq \frac{125,02}{100} \times 100\% I_n \\
 93,77\% I_n &\leq Tap \leq 125,02\% I_n
 \end{aligned}$$

Dipilih $Tap = 98\%$ (range: 10 – 100% step: 1%)

$I_{set} = 98 A$

Curve Number = 1

Instantaneous Pickup

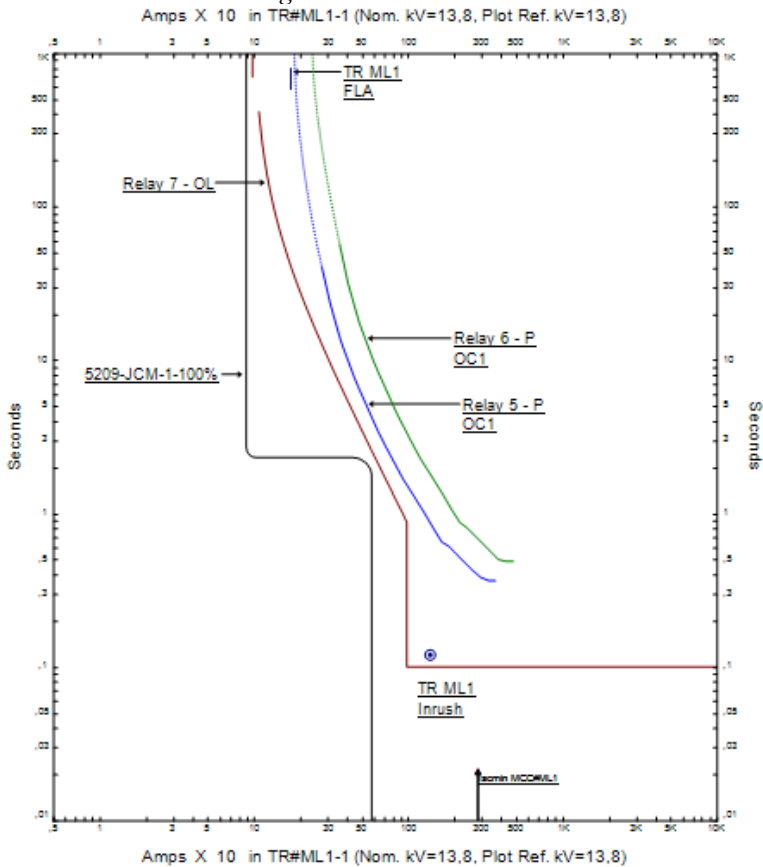
$$\begin{aligned}
 LRC \text{ motor} &< I_{set} \leq 0,8 \times I_{sc}min \\
 580,5 &< I_{set} \leq 0,8 \times 12820 \\
 580,5 &< I_{set} \leq 10256 \\
 \frac{580,5}{98} I_n &< Tap \leq \frac{10256}{98} I_n \\
 5,93 I_n &< Tap \leq 104,65 I_n
 \end{aligned}$$

Dipilih $Tap = 10$ (range: fixed step: fixed)

$I_{set} = 980$

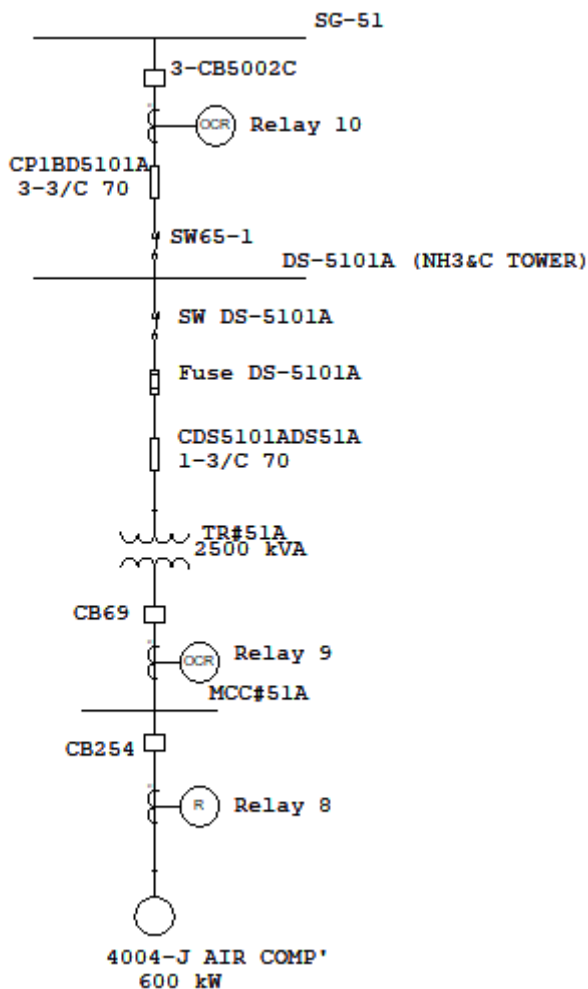
Delay = 0,1 second

Gambar 4.7 berikut merupakan *time current curve* Tipikal 2 setelah dilakukan *Resetting*.



Gambar 4.7 Time Current Curve Kondisi *Resetting* Tipikal 2

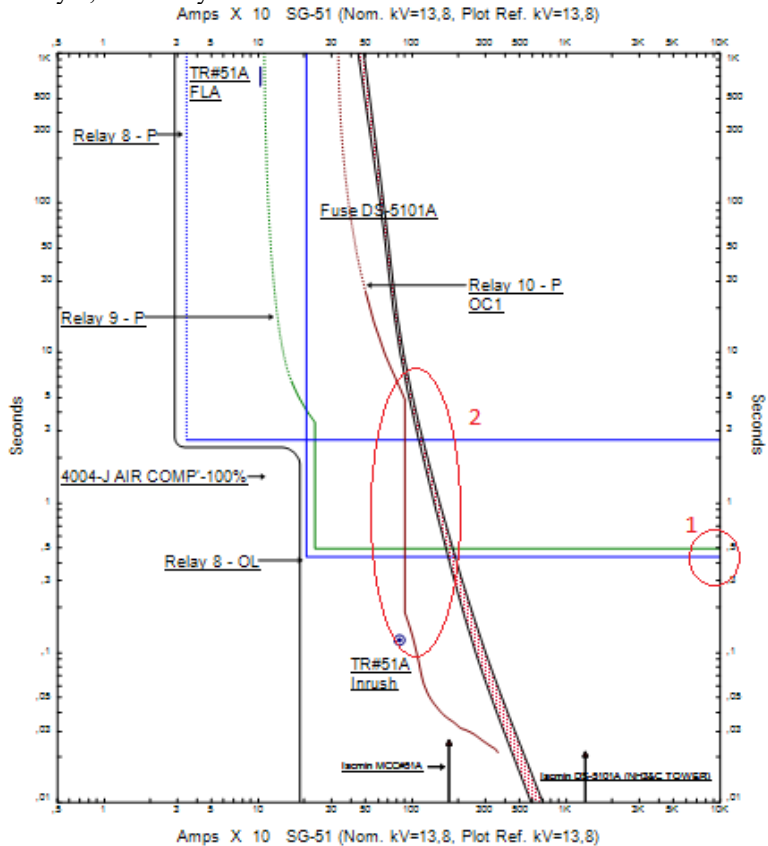
4.6.3 Koordinasi Rele Arus Lebih Tipikal 3



Gambar 4.8 SLD Tipikal 3

Tipikal 3 merupakan tipikal dengan beban motor terjauh dari sumber dengan mengacu pada jumlah *bus* yang dilewati. Terdapat dua

level tegangan yaitu 13,8 kV dan 2,4 kV. Tipikal ini dimulai dari motor 4004-J AIR COMP' menuju *bus* SG-51 melewati transformator TR#51A. Pada tipikal ini terdapat tiga rele yang akan dikoordinasikan yaitu Relay8, Relay 9, dan Relay 10.



Gambar 4.9 Time Current Curve Kondisi Existing Tipikal 3

Berdasarkan Gambar 4.9 dapat diketahui bahwa terdapat *setting* peralatan dan koordinasi antara peralatan yang kurang baik pada Tipikal 3. Kesalahan tersebut terdapat pada area yang telah diberi tanda lingkaran merah pada Gambar 4.9. Berikut merupakan penjelasan kesalahan penyetelan pada Tipikal 3:

1. Waktu operasi Relay 8 terlalu lama, sebagai rele pengaman motor seharusnya Relay 8 bekerja pada waktu 0,1 detik. Waktu operasi Relay 8 dan Relay 9 juga terlalu berdekatan, sehingga ketika terjadi gangguan hubung singkat di sisi motor 4004-J AIR COMP' kedua rele akan bekerja dalam waktu yang hampir bersamaan. Perlu dilakukan penyetelan ulang pada *time delay* dari kedua rele tersebut
2. Relay 10 terletak pada *upstream* saluran dibandingkan dengan Relay 8 dan 9, dimana seharusnya rele ini beroperasi sebagai Relay *backup* dari Relay 9. Melihat posisi kurva *instantaneous* Relay 10, ketika terjadi gangguan hubung singkat pada bus MCC#51A Relay 10 akan *trip* terlebih dahulu dibandingkan Relay 9. Hal ini merupakan kesalahan koordinasi yang harus diperbaiki.

Sebelum melakukan penyetelan ulang peralatan-peralatan pengaman pada Tipikal 3, perlu dilakukan perhitungan manual terlebih dahulu. Berikut merupakan perhitungan manual untuk *setting* peralatan pada Tipikal 3:

Setting Relay 8

Tabel 4.11 Spesifikasi dan Data Penunjang *Setting* Relay 8

<i>Manufacturer</i>	ABB
<i>Model</i>	SPAM 150C
<i>Curve Type</i>	<i>Definite Time</i>
<i>CT Ratio</i>	200:5
FLA 4004-J AIR COMP'	174,6 A
LRC 4004-J AIR COMP'	1135 A
$I_{sc\ min\ Bus\ MCC\#51A}$	8320 A
$I_{sc\ max\ Bus\ MCC\#51A}$	10580 A

Time Overcurrent Pickup

$$\begin{array}{lll}
 1,05 \times FLA & \leq I_{set} \leq & 1,4 \times FLA \\
 1,05 \times 174,6 & \leq I_{set} \leq & 1,4 \times 174,6 \\
 183,33 & \leq I_{set} \leq & 244,44 \\
 \frac{183,33}{200} I_n & \leq Tap \leq & \frac{244,44}{200} I_n \\
 0,92 I_n & \leq Tap \leq & 1,22 I_n
 \end{array}$$

Dipilih $Tap = 1$ (range: 1 – 10xCTsec step: 0,1)

$$I_{set} = 200 \text{ A}$$

Time Dial

Dipilih *time dial* = 2,6 (range: 0,3 – 80 step: 0,1)

Instantaneous Pickup

$$\begin{array}{lll} \text{LRC motor} & < I_{set} \leq & 0,8 \times I_{sc} \min \\ 1135 & < I_{set} \leq & 0,8 \times 8320 \\ 1135 & < I_{set} \leq & 6656 \\ \frac{1135}{200} I_n & < Tap \leq & \frac{6656}{200} I_n \\ 5,68 I_n & < Tap \leq & 33,28 I_n \end{array}$$

Dipilih *Tap* = 6 (range: 0,5 – 20xCTsec step: 0,1)

$$I_{set} = 1200$$

Delay = 0,1 second

Setting Relay 9

Tabel 4.12 Spesifikasi dan Data Penunjang *Setting Relay 9*

<i>Manufacturer</i>	ABB
<i>Model</i>	SPAJ 140C(SPCJ 4D29)
<i>Curve Type</i>	IEC-Normal Inverse
<i>CT Ratio</i>	800:5
FLA Sekunder TR#51A	601,4 A
$I_{sc} \min$ Bus MCC#51A	8320 A
$I_{sc} \max$ Bus MCC#51A	10580 A

Time Overcurrent Pickup

$$\begin{array}{lll} 1,05 \times FLA & \leq I_{set} \leq & 1,4 \times FLA \\ 1,05 \times 601,4 & \leq I_{set} \leq & 1,4 \times 601,4 \\ 631,47 & \leq I_{set} \leq & 841,96 \\ \frac{631,47}{800} I_n & \leq Tap \leq & \frac{841,96}{800} I_n \\ 0,79 I_n & \leq Tap \leq & 1,05 I_n \end{array}$$

Dipilih *Tap* = 0,8 (range: 0,5 – 2,5xCTsec step: 0,01)

$$I_{set} = 640 \text{ A}$$

Time Dial

Dipilih waktu operasi (t) = 0,3 detik

$$t_d = \frac{k}{\left(\frac{I}{I_s}\right)^\alpha - 1} \times \frac{T}{\beta}$$

$$t_d = \frac{0,14}{\left(\frac{I_{scmax}}{I_{set}}\right)^{0,02} - 1} \times \frac{T}{2,97}$$

$$T = \frac{t_d \times 2,97 \times \left[\left(\frac{I_{scmax}}{I_{set}}\right)^{0,02} - 1\right]}{0,14}$$

$$T = \frac{0,1 \times 2,97 \times \left[\left(\frac{10580}{640}\right)^{0,02} - 1\right]}{0,14}$$

$$T = 0,37$$

Dipilih time dial = 0,37 (range: 0,05 – 1 step: 0,01)

Instantaneous Pickup

$$\begin{array}{lll} 1,6 \times FLA & \leq I_{set} \leq & 0,8 \times I_{scmin} \\ 1,6 \times 601,4 & \leq I_{set} \leq & 0,8 \times 8320 \\ 962,24 & \leq I_{set} \leq & 6656 \\ \frac{962,24}{800} I_n & \leq Tap \leq & \frac{6656}{800} I_n \\ 1,21 I_n & \leq Tap \leq & 8,32 I_n \end{array}$$

Dipilih Tap = 1,7 (range: 0,5 – 40xCTsec step: 0,1)

$$I_{set} = 1360 A$$

Setting Relay 10

Tabel 4.13 Spesifikasi dan Data Penunjang Setting Relay 10

<i>Manufacturer</i>	Basler Electric
<i>Model</i>	BE1-51
<i>Curve Type</i>	E7-BS142 <i>Very Inverse</i>
<i>CT Ratio</i>	300:5
FLA Primer	240,57 A
TR#51A+TR#51+TR#53	
I_{scmin} Bus DS-5101A	12800 A
I_{scmax} Bus DS-5101A	19300 A

Time Overcurrent Pickup

$$\begin{array}{lll}
 1,05 \times FLA & \leq I_{set} \leq & 1,4 \times FLA \\
 1,05 \times 240,57 & \leq I_{set} \leq & 1,4 \times 240,57 \\
 252,6 & \leq I_{set} \leq & 336,79 \\
 \frac{252,6}{300/5} I_n & \leq Tap \leq & \frac{336,79}{300/5} I_n \\
 4,21 I_n & \leq Tap \leq & 5,61 I_n
 \end{array}$$

Dipilih $Tap = 5,6$ (range: 0,5 – 12 step: 0,01)

$I_{set} = 336 A$

Time Dial

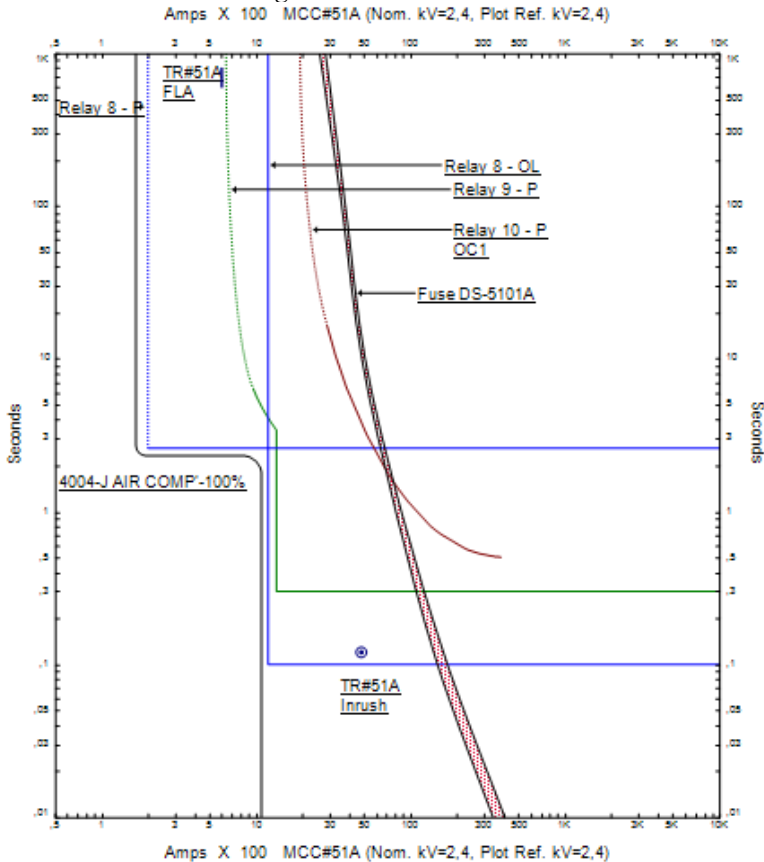
Dipilih waktu operasi (t) = 0,5 detik

$$\begin{aligned}
 t_d &= \frac{k}{\left(\frac{I}{I_s}\right)^\alpha - 1} \times \frac{T}{\beta} \\
 t_d &= \frac{13,5}{\left(\frac{I_{sc}^{max}}{I_{set}}\right) - 1} \times \frac{T}{1,5} \\
 T &= \frac{t_d \times 1,5 \times \left[\left(\frac{I_{sc}^{max}}{I_{set}}\right) - 1\right]}{13,5} \\
 T &= \frac{0,5 \times 1,5 \times \left[\left(\frac{19300}{336}\right) - 1\right]}{13,5} \\
 T &= 3,14
 \end{aligned}$$

Dipilih $time\ dial = 17$ (range: 0 – 99 step: 1,0)

Instantaneous = Disabled

Gambar 4.10 berikut merupakan *time current curve* Tipikal 3 setelah dilakukan *Resetting*.



Gambar 4.10 Time Current Curve Kondisi *Resetting* Tipikal 3

4.7 Hasil Simulasi *Arc Flash* pada Kondisi *Existing*

Simulasi *arc flash* menggunakan *software* ETAP 12.6 dengan standar IEEE 1584-2002. Simulasi dilakukan pada *bus* utama kondisi *Existing* sistem kelistrikan Pusri IB. Tabel 4.14 berikut menunjukkan hasil dari simulasi yang telah dilakukan berupa *Incident Energy* (E), *Flash Protection Boundary*, dan *Hazard Risk Category*.

Tabel 4.14 Data Hasil Simulasi *Arc Flash* pada Kondisi *Existing*

ID	Tegangan (kV)	<i>Incident Energy</i> (cal/cm ²)	<i>Flash Protection Boundary</i> (m)	<i>Hazard Risk Category</i>
SG-51	13,80	32,463	27,101	4
DS-5101A	13,80	2,193	0,849	1
DS-58/58A	13,80	45,616	19,222	>4
MCC#51A	2,40	1,207	0,460	1
MCC#58	2,40	2,230	0,864	1
MCC#ML1	2,40	2,013	0,778	1
MCC#511	0,48	41,108	3,938	>4

4.8 Perhitungan *Arc Flash* Pada Kondisi *Existing*

Perhitungan manual dilakukan sesuai dengan standar IEEE 1584-2002. Untuk melakukan perhitungan manual dibutuhkan data-data dari bus kondisi *Existing* yaitu data *Bolted Fault Current* (I_{bf}), *Fault Clearing Time* (FCT), *Working Distance* (m), *Gap* (mm), dan *X Factor*. Tabel 4.15 berikut menunjukkan data-data tersebut.

Tabel 4.15 Data *Bus* Kondisi *Existing* untuk Perhitungan Manual

ID	Tegangan (kV)	I_{bf} (kA)	FCT (sec.)	<i>Working Distance</i> (mm)	<i>Gap</i> (mm)	<i>X Factor</i>
SG-51	13,80	21,08	0,910	914	153	0,973
DS-5101A	13,80	21,04	0,031	457	153	0,973
DS-58/58A	13,80	19,44	0,710	457	153	0,973
MCC#51A	2,40	11,73	0,047	457	102	0,973
MCC#58	2,40	20,51	0,048	457	102	0,973
MCC#ML1	2,40	19,97	0,045	457	102	0,973
MCC#511	0,48	43,75	0,5	457	25	1,641

Bus SG-51

Incident Energy

$$\begin{aligned}
 lg I_a &= 0,00402 + 0,983 lg I_{bf} \\
 &= 0,00402 + (0,983 \times lg 21,08) \\
 lg I_a &= 1,305 \\
 I_a &= 10^{lg I_a}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= 10^{1,305} \\
I_a &= 20,21 \text{ kA} \\
lg E_n &= K1 + K2 + 1,081 lg I_a + 0,0011 G \\
&= -0,55 + 0 + (1,081 \times 1,305) + (0,0011 \times 153) \\
lg E_n &= 1,03 \\
E_n &= 10^{1,03} \\
E_n &= 10,7 \text{ J/cm}^2 \\
E &= 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right) \\
&= 4,184 \times 1 \times 10,7 \times \left(\frac{0,91}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{914^{0,973}}\right) \\
E &= 137,451 \text{ J/cm}^2 \\
E &= \frac{137,451}{4,184} = 32,852 \text{ cal/cm}^2
\end{aligned}$$

Flash Protection Boundary

$$\begin{aligned}
D_B &= \left[4.184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^x}{E_B}\right) \right]^{\frac{1}{x}} \\
&= \left[4.184 \times 1 \times 10,7 \times \left(\frac{0,91}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{5}\right) \right]^{\frac{1}{0,973}} \\
D_B &= 27546,2 \text{ mm} \\
D_B &= 27,546 \text{ m}
\end{aligned}$$

Bus DS-5101A

Incident Energy

$$\begin{aligned}
lg I_a &= 0,00402 + 0,983 lg I_{bf} \\
&= 0,00402 + (0,983 \times lg 21,04) \\
lg I_a &= 1,304 \\
I_a &= 10^{lg I_a} \\
&= 10^{1,304} \\
I_a &= 20,164 \text{ kA} \\
lg E_n &= K1 + K2 + 1,081 lg I_a + 0,0011 G \\
&= -0,55 + 0 + (1,081 \times 1,304) + (0,0011 \times 153) \\
lg E_n &= 1,029 \\
E_n &= 10^{1,029}
\end{aligned}$$

$$E_n = 10,679 \text{ J/cm}^2$$

$$\begin{aligned} E &= 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right) \\ &= 4,184 \times 1 \times 10,679 \times \left(\frac{0,031}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{457^{0,973}}\right) \end{aligned}$$

$$E = 9,173 \text{ J/cm}^2$$

$$E = \frac{9,173}{4,184} = 2,192 \text{ cal/cm}^2$$

Flash Protection Boundary

$$\begin{aligned} D_B &= \left[4.184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^x}{E_B}\right) \right]^{\frac{1}{x}} \\ &= \left[4.184 \times 1 \times 10,679 \times \left(\frac{0,031}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{5}\right) \right]^{\frac{1}{0,973}} \\ D_B &= 852,617 \text{ mm} \\ D_B &= 0,852 \text{ m} \end{aligned}$$

Bus DS-58/58A

Incident Energy

$$\begin{aligned} lg I_a &= 0,00402 + 0,983 lg I_{bf} \\ &= 0,00402 + (0,983 \times lg 19,44) \end{aligned}$$

$$lg I_a = 1,271$$

$$\begin{aligned} I_a &= 10^{lg I_a} \\ &= 10^{1,271} \end{aligned}$$

$$I_a = 18,655 \text{ kA}$$

$$\begin{aligned} lg E_n &= K1 + K2 + 1,081 lg I_a + 0,0011 G \\ &= -0,55 + 0 + (1,081 \times 1,271) + (0,0011 \times 153) \end{aligned}$$

$$lg E_n = 0,992$$

$$E_n = 10^{0,992}$$

$$E_n = 9,818 \text{ J/cm}^2$$

$$\begin{aligned} E &= 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right) \\ &= 4,184 \times 1 \times 9,818 \times \left(\frac{0,71}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{457^{0,973}}\right) \end{aligned}$$

$$E = 193,148 \text{ J/cm}^2$$

$$E = \frac{193,148}{4,184} = 46,163 \text{ cal/cm}^2$$

Flash Protection Boundary

$$D_B = \left[4.184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2} \right) \times \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$= \left[4.184 \times 1 \times 9,818 \times \left(\frac{0,71}{0.2} \right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 19537,7 \text{ mm}$$

$$D_B = 19,537 \text{ m}$$

Bus MCC#51A

Incident Energy

$$lg I_a = 0,00402 + 0,983 lg I_{bf}$$

$$= 0,00402 + (0,983 \times lg 11,73)$$

$$lg I_a = 1,055$$

$$I_a = 10^{lg I_a}$$

$$= 10^{1,055}$$

$$I_a = 11,353 \text{ kA}$$

$$lg E_n = K1 + K2 + 1,081 lg I_a + 0,0011 G$$

$$= -0,55 - 0,113 + (1,081 \times 1,055) + (0,0011 \times 102)$$

$$lg E_n = 0,589$$

$$E_n = 10^{0,589}$$

$$E_n = 3,888 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2} \right) \times \left(\frac{610^x}{D^x} \right)$$

$$= 4,184 \times 1 \times 3,888 \times \left(\frac{0,047}{0.2} \right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{457^{0,973}} \right)$$

$$E = 5,064 \text{ J/cm}^2$$

$$E = \frac{5,064}{4,184} = 1,21 \text{ cal/cm}^2$$

Flash Protection Boundary

$$D_B = \left[4.184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2} \right) \times \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$= \left[4,184 \times 1 \times 3,888 \times \left(\frac{0,047}{0.2} \right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 463,012 \text{ mm}$$

$$D_B = 0,463 \text{ m}$$

Bus MCC#58

Incident Energy

$$\begin{aligned} \lg I_a &= 0,00402 + 0,983 \lg I_{bf} \\ &= 0,00402 + (0,983 \times \lg 20,51) \\ \lg I_a &= 1,293 \\ I_a &= 10^{\lg I_a} \\ &= 10^{1,293} \\ I_a &= 19,664 \text{ kA} \\ \lg E_n &= K1 + K2 + 1,081 \lg I_a + 0,0011 G \\ &= -0,55 - 0,113 + (1,081 \times 1,293) + (0,0011 \times 102) \\ \lg E_n &= 0,847 \\ E_n &= 10^{0,847} \\ E_n &= 7,041 \text{ J/cm}^2 \\ E &= 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2} \right) \times \left(\frac{610^x}{D^x} \right) \\ &= 4,184 \times 1 \times 7,041 \times \left(\frac{0,048}{0.2} \right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{457^{0,973}} \right) \\ E &= 9,364 \text{ J/cm}^2 \\ E &= \frac{9,364}{4,184} = 2,238 \text{ cal/cm}^2 \end{aligned}$$

Flash Protection Boundary

$$D_B = \left[4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2} \right) \times \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$= \left[4,184 \times 1 \times 7,041 \times \left(\frac{0,048}{0.2} \right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 870,982 \text{ mm}$$

$$D_B = 0,87 \text{ m}$$

Bus MCC#ML1

Incident Energy

$$\begin{aligned}lg I_a &= 0,00402 + 0,983 lg I_{bf} \\&= 0,00402 + (0,983 \times lg 19,97) \\lg I_a &= 1,282 \\I_a &= 10^{lg I_a} \\&= 10^{1,282} \\I_a &= 19,155 kA \\lg E_n &= K1 + K2 + 1,081 lg I_a + 0,0011 G \\&= -0,55 - 0,113 + (1,081 \times 1,282) + (0,0011 \times 102) \\lg E_n &= 0,835 \\E_n &= 10^{0,835} \\E_n &= 6,844 J/cm^2 \\E &= 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right) \\&= 4,184 \times 1 \times 6,844 \times \left(\frac{0,045}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{457^{0,973}}\right) \\E &= 8,534 J/cm^2 \\E &= \frac{8,534}{4,184} = 2,039 cal/cm^2\end{aligned}$$

Flash Protection Boundary

$$\begin{aligned}D_B &= \left[4.184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^x}{E_B}\right)\right]^{\frac{1}{x}} \\&= \left[4.184 \times 1 \times 6,844 \times \left(\frac{0,045}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{5}\right)\right]^{\frac{1}{0,973}} \\D_B &= 791,677 mm \\D_B &= 0,791 m\end{aligned}$$

Bus MCC#511

Incident Energy

$$\begin{aligned}lg I_a &= K + 0,662 lg I_{bf} + 0,0966 V + 0,000526 G \\&\quad + 0,5588 V(lg I_{bf}) - 0,00304 G (lg I_{bf}) \\&= -0,097 + (0,662 \times lg 43,75) + (0,0966 \times 0,48)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + (0,000526 \times 25) + \{(0,5588 \times 0,48) \times (\lg 43,75)\} \\
& - \{(0,00304 \times 25) \times (\lg 43,75)\} \\
\lg I_a &= 1,364 \\
I_a &= 10^{\lg I_a} \\
&= 10^{1,364} \\
I_a &= 23,12 \text{ kA} \\
\lg E_n &= K1 + K2 + 1,081 \lg I_a + 0,0011 G \\
&= -0,55 - 0,113 + (1,081 \times 1,364) + (0,0011 \times 25) \\
\lg E_n &= 0,838 \\
E_n &= 10^{0,838} \\
E_n &= 6,902 \text{ J/cm}^2 \\
E &= 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right) \\
&= 4,184 \times 1,5 \times 6,902 \times \left(\frac{0,5}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{1,641}}{457^{1,641}}\right) \\
E &= 173,944 \text{ J/cm}^2 \\
E &= \frac{173,944}{4,184} = 41,573 \text{ cal/cm}^2
\end{aligned}$$

Flash Protection Boundary

$$\begin{aligned}
D_B &= \left[4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^x}{E_B}\right) \right]^{\frac{1}{x}} \\
&= \left[4,184 \times 1,5 \times 6,902 \times \left(\frac{0,5}{0,2}\right) \times \left(\frac{610^{1,641}}{5}\right) \right]^{\frac{1}{1,641}} \\
D_B &= 3974,169 \text{ mm} \\
D_B &= 3,974 \text{ m}
\end{aligned}$$

4.9 Perbandingan Hasil Simulasi dengan Perhitungan Arc Flash pada Kondisi Existing

Setelah melakukan simulasi dan perhitungan *arc flash* pada kondisi *Existing*, dilakukan perbandingan antara kedua hasil tersebut. Berikut merupakan perbandingan hasil simulasi dan perhitungan *arc flash*.

Tabel 4.16 Perbandingan Hasil Simulasi dengan Perhitungan *Arc Flash* pada Kondisi *Existing*

ID	Hasil Simulasi <i>Incident Energy</i> (cal/cm ²)	Hasil Perhitungan <i>Incident Energy</i> (cal/cm ²)	Hasil Simulasi <i>Flash Protection Boundary</i> (m)	Hasil Perhitungan <i>Flash Protection Boundary</i> (m)
SG-51	32,463	32,852	27,101	27,546
DS-5101A	2,193	2,192	0,849	0,852
DS-58/58A	45,616	46,163	19,222	19,537
MCC#51A	1,207	1,21	0,460	0,463
MCC#58	2,230	2,238	0,864	0,87
MCC#ML1	2,013	2,039	0,778	0,791
MCC#511	41,108	41,573	3,938	3,974

Dari data pada Tabel 4.16 diatas terdapat sedikit perbedaan antara hasil simulasi dengan perhitungan. Hal ini disebabkan pada perhitungan manual terdapat beberapa pembulatan angka di setiap hasilnya sehingga menyebabkan hasil akhir dari setiap perhitungan sedikit berbeda dengan hasil simulasi.

4.10 Hasil Simulasi *Arc Flash* pada Kondisi *Resetting*

Simulasi *arc flash* menggunakan *software* ETAP 12.6 dengan standar IEEE 1584-2002. Simulasi dilakukan pada *bus* utama kondisi *Resetting* sistem kelistrikan Pusri IB. Tabel 4.17 berikut menunjukkan hasil dari simulasi yang telah dilakukan berupa *Incident Energy* (E), *Flash Protection Boundary*, dan *Hazard Risk Category*.

Tabel 4.17 Data Hasil Simulasi *Arc Flash* pada Kondisi *Resetting*

ID	Tegangan (kV)	<i>Incident Energy</i> (cal/cm ²)	<i>Flash Protection Boundary</i> (m)	<i>Hazard Risk Category</i>
SG-51	13,80	25,328	21,000	4
DS-5101A	13,80	35,935	15,042	4
DS-58/58A	13,80	19,917	8,202	3
MCC#51A	2,40	7,887	3,166	2
MCC#58	2,40	25,994	10,784	4

Tabel 4.17 Data Hasil Simulasi *Arc Flash* pada Kondisi *Resetting* (Lanjutan)

ID	Tegangan (kV)	<i>Incident Energy</i> (cal/cm ²)	<i>Flash Protection Boundary</i> (m)	<i>Hazard Risk Category</i>
MCC#ML1	2,40	18,878	7,763	3
MCC#511	0,48	31,242	3,331	4

4.11 Perhitungan *Arc Flash* Pada Kondisi *Resetting*

Perhitungan manual dilakukan sesuai dengan standar IEEE 1584-2002. Untuk melakukan perhitungan manual dibutuhkan data-data dari bus kondisi *Resetting* yaitu data *Bolted Fault Current* (I_{bf}), *Fault Clearing Time* (FCT), *Working Distance* (m), *Gap* (mm), dan *X Factor*. Tabel 4.18 berikut menunjukkan data-data tersebut.

Tabel 4.18 Data Bus Kondisi *Resetting* Untuk Perhitungan Manual

ID	Tegangan (kV)	I_{bf} (kA)	FCT (sec.)	<i>Working Distance</i> (mm)	<i>Gap</i> (mm)	<i>X Factor</i>
SG-51	13,80	21,08	0,710	914	153	0,973
DS-5101A	13,80	21,04	0,514	457	153	0,973
DS-58/58A	13,80	19,44	0,310	457	153	0,973
MCC#51A	2,40	11,73	0,310	457	102	0,973
MCC#58	2,40	20,51	0,564	457	102	0,973
MCC#ML1	2,40	19,97	0,421	457	102	0,973
MCC#511	0,48	43,75	0,380	457	25	1,641

Bus SG-51

Incident Energy

$$\begin{aligned} \lg I_a &= 0,00402 + 0,983 \lg I_{bf} \\ &= 0,00402 + (0,983 \times \lg 21,08) \end{aligned}$$

$$\lg I_a = 1,305$$

$$\begin{aligned} I_a &= 10^{\lg I_a} \\ &= 10^{1,305} \end{aligned}$$

$$I_a = 20,21 \text{ kA}$$

$$\begin{aligned} \lg E_n &= K1 + K2 + 1,081 \lg I_a + 0,0011 G \\ &= -0,55 + 0 + (1,081 \times 1,305) + (0,0011 \times 153) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
lg E_n &= 1,03 \\
E_n &= 10^{1,03} \\
E_n &= 10,7 \text{ J/cm}^2 \\
E &= 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right) \\
&= 4,184 \times 1 \times 10,7 \times \left(\frac{0,71}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{914^{0,973}}\right) \\
E &= 107,242 \text{ J/cm}^2 \\
E &= \frac{107,242}{4,184} = 25,631 \text{ cal/cm}^2
\end{aligned}$$

Flash Protection Boundary

$$\begin{aligned}
D_B &= \left[4.184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^x}{E_B}\right) \right]^{\frac{1}{x}} \\
&= \left[4.184 \times 1 \times 10,7 \times \left(\frac{0,71}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{5}\right) \right]^{\frac{1}{0,973}} \\
D_B &= 21344,58 \text{ mm} \\
D_B &= 21,344 \text{ m}
\end{aligned}$$

Bus DS-5101A

Incident Energy

$$\begin{aligned}
lg I_a &= 0,00402 + 0,983 lg I_{bf} \\
&= 0,00402 + (0,983 \times lg 21,04) \\
lg I_a &= 1,304 \\
I_a &= 10^{lg I_a} \\
&= 10^{1,304} \\
I_a &= 20,164 \text{ kA} \\
lg E_n &= K1 + K2 + 1,081 lg I_a + 0,0011 G \\
&= -0,55 + 0 + (1,081 \times 1,304) + (0,0011 \times 153) \\
lg E_n &= 1,029 \\
E_n &= 10^{1,029} \\
E_n &= 10,679 \text{ J/cm}^2 \\
E &= 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right)
\end{aligned}$$

$$= 4,184 \times 1 \times 10,679 \times \left(\frac{0,514}{0.2} \right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{457^{0,973}} \right)$$

$$E = 152,088 \text{ J/cm}^2$$

$$E = \frac{152,088}{4,184} = 36,35 \text{ cal/cm}^2$$

Flash Protection Boundary

$$D_B = \left[4.184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2} \right) \times \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$= \left[4.184 \times 1 \times 10,679 \times \left(\frac{0,514}{0.2} \right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 15282,65 \text{ mm}$$

$$D_B = 15,282 \text{ m}$$

Bus DS-58/58A

Incident Energy

$$\lg I_a = 0,00402 + 0,983 \lg I_{bf}$$

$$= 0,00402 + (0,983 \times \lg 19,44)$$

$$\lg I_a = 1,271$$

$$I_a = 10^{\lg I_a}$$

$$= 10^{1,271}$$

$$I_a = 18,655 \text{ kA}$$

$$\lg E_n = K1 + K2 + 1,081 \lg I_a + 0,0011 G$$

$$= -0,55 + 0 + (1,081 \times 1,271) + (0,0011 \times 153)$$

$$\lg E_n = 0,992$$

$$E_n = 10^{0,992}$$

$$E_n = 9,818 \text{ J/cm}^2$$

$$E = 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2} \right) \times \left(\frac{610^x}{D^x} \right)$$

$$= 4,184 \times 1 \times 9,818 \times \left(\frac{0,31}{0.2} \right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{457^{0,973}} \right)$$

$$E = 84,332 \text{ J/cm}^2$$

$$E = \frac{84,332}{4,184} = 20,155 \text{ cal/cm}^2$$

Flash Protection Boundary

$$\begin{aligned} D_B &= \left[4.184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2} \right) \times \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \\ &= \left[4.184 \times 1 \times 9,818 \times \left(\frac{0,31}{0.2} \right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}} \\ D_B &= 8336,619 \text{ mm} \\ D_B &= 8,336 \text{ m} \end{aligned}$$

Bus MCC#51A

Incident Energy

$$\begin{aligned} \lg I_a &= 0,00402 + 0,983 \lg I_{bf} \\ &= 0,00402 + (0,983 \times \lg 11,73) \\ \lg I_a &= 1,055 \\ I_a &= 10^{\lg I_a} \\ &= 10^{1,055} \\ I_a &= 11,353 \text{ kA} \\ \lg E_n &= K1 + K2 + 1,081 \lg I_a + 0,0011 G \\ &= -0,55 - 0,113 + (1,081 \times 1,055) + (0,0011 \times 102) \\ \lg E_n &= 0,589 \\ E_n &= 10^{0,589} \\ E_n &= 3,888 \text{ J/cm}^2 \\ E &= 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2} \right) \times \left(\frac{610^x}{D^x} \right) \\ &= 4,184 \times 1 \times 3,888 \times \left(\frac{0,31}{0.2} \right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{457^{0,973}} \right) \\ E &= 33,4 \text{ J/cm}^2 \\ E &= \frac{33,4}{4,184} = 7,982 \text{ cal/cm}^2 \end{aligned}$$

Flash Protection Boundary

$$\begin{aligned} D_B &= \left[4.184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2} \right) \times \left(\frac{610^x}{E_B} \right) \right]^{\frac{1}{x}} \\ &= \left[4.184 \times 1 \times 3,888 \times \left(\frac{0,31}{0.2} \right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{5} \right) \right]^{\frac{1}{0,973}} \end{aligned}$$

$$D_B = 3218,033 \text{ mm}$$

$$D_B = 3,218 \text{ m}$$

Bus MCC#58

Incident Energy

$$\begin{aligned} \lg I_a &= 0,00402 + 0,983 \lg I_{bf} \\ &= 0,00402 + (0,983 \times \lg 20,51) \end{aligned}$$

$$\lg I_a = 1,293$$

$$\begin{aligned} I_a &= 10^{\lg I_a} \\ &= 10^{1,293} \end{aligned}$$

$$I_a = 19,664 \text{ kA}$$

$$\begin{aligned} \lg E_n &= K1 + K2 + 1,081 \lg I_a + 0,0011 G \\ &= -0,55 - 0,113 + (1,081 \times 1,293) + (0,0011 \times 102) \end{aligned}$$

$$\lg E_n = 0,847$$

$$E_n = 10^{0,847}$$

$$E_n = 7,041 \text{ J/cm}^2$$

$$\begin{aligned} E &= 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right) \\ &= 4,184 \times 1 \times 7,041 \times \left(\frac{0,564}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{457^{0,973}}\right) \end{aligned}$$

$$E = 110,037 \text{ J/cm}^2$$

$$E = \frac{110,037}{4,184} = 26,299 \text{ cal/cm}^2$$

Flash Protection Boundary

$$D_B = \left[4.184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^x}{E_B}\right) \right]^{\frac{1}{x}}$$

$$= \left[4.184 \times 1 \times 7,041 \times \left(\frac{0,564}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{5}\right) \right]^{\frac{1}{0,973}}$$

$$D_B = 10958,22 \text{ mm}$$

$$D_B = 10,958 \text{ m}$$

Bus MCC#ML1

Incident Energy

$$\begin{aligned}lg I_a &= 0,00402 + 0,983 lg I_{bf} \\&= 0,00402 + (0,983 \times lg 19,97) \\lg I_a &= 1,282 \\I_a &= 10^{lg I_a} \\&= 10^{1,282} \\I_a &= 19,155 kA \\lg E_n &= K1 + K2 + 1,081 lg I_a + 0,0011 G \\&= -0,55 - 0,113 + (1,081 \times 1,282) + (0,0011 \times 102) \\lg E_n &= 0,835 \\E_n &= 10^{0,835} \\E_n &= 6,844 J/cm^2 \\E &= 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right) \\&= 4,184 \times 1 \times 6,844 \times \left(\frac{0,421}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{457^{0,973}}\right) \\E &= 79,841 J/cm^2 \\E &= \frac{79,841}{4,184} = 19,082 cal/cm^2\end{aligned}$$

Flash Protection Boundary

$$\begin{aligned}D_B &= \left[4.184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^x}{E_B}\right) \right]^{\frac{1}{x}} \\&= \left[4.184 \times 1 \times 6,844 \times \left(\frac{0,421}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^{0,973}}{5}\right) \right]^{\frac{1}{0,973}} \\D_B &= 7880,689 mm \\D_B &= 7,88 m\end{aligned}$$

Bus MCC#511

Incident Energy

$$\begin{aligned}lg I_a &= K + 0,662 lg I_{bf} + 0,0966 V + 0,000526 G \\&\quad + 0,5588 V(lg I_{bf}) - 0,00304 G (lg I_{bf}) \\&= -0,097 + (0,662 \times lg 43,75) + (0,0966 \times 0,48)\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + (0,000526 \times 25) + \{(0,5588 \times 0,48) \times (\lg 43,75)\} \\
& - \{(0,00304 \times 25) \times (\lg 43,75)\} \\
\lg I_a &= 1,364 \\
I_a &= 10^{\lg I_a} \\
&= 10^{1,364} \\
I_a &= 23,12 \text{ kA} \\
\lg E_n &= K1 + K2 + 1,081 \lg I_a + 0,0011 G \\
&= -0,55 - 0,113 + (1,081 \times 1,364) + (0,0011 \times 25) \\
\lg E_n &= 0,838 \\
E_n &= 10^{0,838} \\
E_n &= 6,902 \text{ J/cm}^2 \\
E &= 4,184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^x}{D^x}\right) \\
&= 4,184 \times 1,5 \times 6,902 \times \left(\frac{0,38}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^{1,641}}{457^{1,641}}\right) \\
E &= 132,197 \text{ J/cm}^2 \\
E &= \frac{132,197}{4,184} = 31,596 \text{ cal/cm}^2
\end{aligned}$$

Flash Protection Boundary

$$\begin{aligned}
D_B &= \left[4.184 \times C_f \times E_n \times \left(\frac{t}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^x}{E_B}\right) \right]^{\frac{1}{x}} \\
&= \left[4.184 \times 1,5 \times 6,902 \times \left(\frac{0,38}{0.2}\right) \times \left(\frac{610^{1,641}}{5}\right) \right]^{\frac{1}{1,641}} \\
D_B &= 3362,141 \text{ mm} \\
D_B &= 3,362 \text{ m}
\end{aligned}$$

4.12 Perbandingan Hasil Simulasi dan Perhitungan Arc Flash pada Kondisi Resetting

Setelah melakukan simulasi dan perhitungan *arc flash* pada kondisi *Resetting*, dilakukan perbandingan antara kedua hasil tersebut. Berikut merupakan perbandingan hasil simulasi dan perhitungan *arc flash*.

Tabel 4.19 Perbandingan Hasil Simulasi dan Perhitungan *Arc Flash* pada Kondisi *Resetting*


ID	Hasil Simulasi <i>Incident Energy</i> (cal/cm ²)	Hasil Perhitungan <i>Incident Energy</i> (cal/cm ²)	Hasil Simulasi <i>Flash Protection Boundary</i> (m)	Hasil Perhitungan <i>Flash Protection Boundary</i> (m)
SG-51	25,328	25,631	21,000	21,344
DS-5101A	35,935	36,35	15,042	15,282
DS-58/58A	19,917	20,155	8,202	8,336
MCC#51A	7,887	7,982	3,166	3,218
MCC#58	25,994	26,299	10,784	10,958
MCC#ML1	18,878	19,082	7,763	7,88
MCC#511	31,242	31,596	3,331	3,362

Dari data pada Tabel 4.19 diatas terdapat sedikit perbedaan antara hasil simulasi dengan perhitungan. Hal ini disebabkan pada perhitungan manual terdapat beberapa pembulatan angka di setiap hasilnya sehingga menyebabkan hasil akhir dari setiap perhitungan sedikit berbeda dengan hasil simulasi.

4.13 Perbandingan *Personal Protective Equipment (PPE)* yang Dibutuhkan pada Kondisi *Existing* dan *Resetting*

Berdasarkan hasil simulasi maupun perhitungan *arc flash* pada kondisi *Existing* dan *Resetting*, berikut merupakan PPE yang dibutuhkan dari masing-masing kondisi sesuai dengan kategori risiko bahaya.


Tabel 4.20 PPE yang Dibutuhkan untuk Kondisi *Existing*

ID	Kategori	PPE	Gambar
SG-51	4	Up to 40 cal/cm ² Flash Suit Hood	
		Pelindung Wajah dan Kepala	
		Pakaian Tahan Api	
		Pelindung Mata	
		Celana Panjang	


Tabel 4.20 PPE yang Dibutuhkan untuk Kondisi *Existing* (Lanjutan)

ID	Kategori	PPE	Gambar
DS-5101A	1	Pelindung Mata	 Hazard Risk Category 1
		Pelindung Telinga	
		Kemeja Lengan Panjang	
		Celana Panjang	
		Helm	
DS-58/58A	>4	Up to 40 cal/cm ² Flash Suit Hood	 Hazard Risk Category 4
		Pelindung Wajah dan Kepala	
		Pakaian Tahan Api	
		Pelindung Mata	
		Pelindung Telinga	
		Celana Panjang	
MCC#51A	1	Pelindung Mata	 Hazard Risk Category 1
		Pelindung Telinga	
		Kemeja Lengan Panjang	
		Celana Panjang	
		Helm	
MCC#58	1	Pelindung Mata	 Hazard Risk Category 1
		Pelindung Telinga	
		Kemeja Lengan Panjang	
		Celana Panjang	
		Helm	

Tabel 4.20 PPE yang Dibutuhkan untuk Kondisi *Existing* (Lanjutan)

ID	Kategori	PPE	Gambar
MCC#ML1	1	Pelindung Mata	 Hazard Risk Category 1
		Pelindung Telinga	
		Kemeja Lengan Panjang	
		Celana Panjang	
		Helm	
MCC#511	>4	Up to 40 cal/cm ² Flash Suit Hood	 Hazard Risk Category 4
		Pelindung Wajah dan Kepala	
		Pakaian Tahan Api	
		Pelindung Mata	
		Pelindung Telinga	
		Celana Panjang	

Tabel 4.21 PPE yang Dibutuhkan untuk Kondisi *Resetting*

ID	Kategori	PPE	Gambar
SG-51	4	Up to 40 cal/cm ² Flash Suit Hood	 Hazard Risk Category 4
		Pelindung Wajah dan Kepala	
		Pakaian Tahan Api	
		Pelindung Mata	
		Pelindung Telinga	
		Celana Panjang	

Tabel 4.21 PPE yang Dibutuhkan untuk Kondisi *Resetting* (Lanjutan)

ID	Kategori	PPE	Gambar
DS-5101A	4	Up to 40 cal/cm ² Flash Suit Hood	 Hazard Risk Category 4
		Pelindung Wajah dan Kepala	
		Pakaian Tahan Api	
		Pelindung Mata	
		Pelindung Telinga	
		Celana Panjang	
DS-58/58A	3	Flash Suit Hood	 Hazard Risk Category 3
		Pelindung Wajah dan Kepala	
		Pakaian Tahan Api	
		Pelindung Mata	
		Pelindung Telinga	
		Celana Panjang	
MCC#51A	2	Flash Suit Hood	 Hazard Risk Category 2
		Pelindung Wajah dan Kepala	
		Pakaian Tahan Api	
		Pelindung Mata	
		Pelindung Telinga	
MCC#58	4	Up to 40 cal/cm ² Flash Suit Hood	 Hazard Risk Category 4
		Pelindung Wajah dan Kepala	
		Pakaian Tahan Api	
		Pelindung Mata	
		Pelindung Telinga	
		Celana Panjang	

Tabel 4.21 PPE yang Dibutuhkan untuk Kondisi *Resetting* (Lanjutan)

ID	Kategori	PPE	Gambar
MCC#58	4	Up to 40 cal/cm ² Flash Suit Hood	 Hazard Risk Category 4
		Pelindung Wajah dan Kepala	
		Pakaian Tahan Api	
		Pelindung Mata	
		Pelindung Telinga	
		Celana Panjang	
MCC#ML1	3	Flash Suit Hood	 Hazard Risk Category 3
		Pelindung Wajah dan Kepala	
		Pakaian Tahan Api	
		Pelindung Mata	
		Pelindung Telinga	
		Celana Panjang	
MCC#511	4	Up to 40 cal/cm ² Flash Suit Hood	 Hazard Risk Category 4
		Pelindung Wajah dan Kepala	
		Pakaian Tahan Api	
		Pelindung Mata	
		Pelindung Telinga	
		Celana Panjang	



Tabel 4.22 Perbandingan PPE yang Dibutuhkan pada Kondisi *Existing* dan *Resetting*

ID	<i>Existing</i>		<i>Resetting</i>	
	Kategori Bahaya	PPE	Kategori Bahaya	PPE
SG-51	4	 Hazard Risk Category 4	4	 Hazard Risk Category 4
DS-5101A	1	 Hazard Risk Category 1	4	 Hazard Risk Category 4
DS-58/58A	>4	 Hazard Risk Category 4	3	 Hazard Risk Category 3

Tabel 4.22 Perbandingan PPE yang Dibutuhkan pada Kondisi *Existing* dan *Resetting* (Lanjutan)

ID	<i>Existing</i>		<i>Resetting</i>	
	Kategori Bahaya	PPE	Kategori Bahaya	PPE
MCC#51A	1	 Hazard Risk Category 1	2	 Hazard Risk Category 2
MCC#58	1	 Hazard Risk Category 1	4	 Hazard Risk Category 4
MCC#ML1	1	 Hazard Risk Category 1	3	 Hazard Risk Category 3

Tabel 4.22 Perbandingan PPE yang Dibutuhkan pada Kondisi *Existing* dan *Resetting* (Lanjutan)

ID	<i>Existing</i>		<i>Resetting</i>	
	Kategori Bahaya	PPE	Kategori Bahaya	PPE
MCC#511	>4	 Hazard Risk Category 4	4	 Hazard Risk Category 4

Dari perbandingan yang telah ditunjukkan pada Tabel 4.22, terjadi peningkatan maupun penurunan *Hazard Risk Category* setelah dilakukan *Resetting* koordinasi proteksi peralatan pengaman. Hal ini disebabkan pada kondisi *Existing Fault Clearing Time* terlalu cepat maupun terlalu lambat, sehingga berdampak pada nilai *incident energy* pada tiap *bus*. Setelah dilakukan *Resetting* juga *Hazard Risk Category* yang melebihi standar dapat diturunkan ke level yang sesuai standar.

BAB 5

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil studi koordinasi proteksi dan *arc flash* yang telah dilakukan pada sistem kelistrikan PT. Pupuk Sriwidjaya Palembang (Pusri) IB, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Pada sistem *Existing* kelistrikan Pusri IB koordinasi proteksi antara peralatan pengaman masih belum baik sehingga perlu diperbaiki. Melihat hasil simulasi dan perhitungan pada setiap tipikal, terdapat beberapa peralatan yang bekerja mengisolasi gangguan terlalu lama yang menyebabkan nilai *Fault Clearing Time* (FCT) yang tinggi. Hal ini berdampak langsung pada nilai *incident energy* yang ikut meningkat, sehingga terdapat beberapa bus yang melewati kategori risiko bahaya sesuai standar NFPA 70E 2009. Terdapat juga rele yang terletak pada *upstream* saluran yang bekerja lebih cepat dari rele di bagian *downstream*-nya. Hal ini menyebabkan daerah yang tidak terkena gangguan ikut terisolasi ketika rele ini bekerja.
2. Pada Tipikal 1 terjadi kesalahan koordinasi antara Relay 1 dan Relay 2. Ketika terjadi hubung singkat di sisi primer transformator TR#511 kedua rele ini akan bekerja dalam waktu yang hampir bersamaan. Hal ini disebabkan oleh karakteristik *instantaneous* rele Basler Electric BE1-51 yang tidak memiliki penyetelan *time delay*, sehingga untuk mengkoordinasikan rele ini harus melakukan *current grading*. Dengan mempertimbangkan keadaan tersebut, pada kondisi *Resetting* penyetelan *instantaneous* untuk Relay 2 dinonaktifkan, hal ini dilakukan untuk memudahkan pengkoordinasian dengan peralatan pengaman lainnya.
3. Pada Tipikal 3 Relay 10 bekerja sangat cepat, lebih cepat daripada Relay 9 dan Relay 8. Hal ini juga disebabkan oleh karakteristik *instantaneous* dari rele Basler Electric BE1-51. Pada kondisi *Resetting*, penyetelan *instantaneous* dinonaktifkan. Melihat kedua rele lainnya melakukan *time grading* dengan penyetelan *time delay*, Relay 10 akan lebih mudah berkoordinasi apabila hanya menggunakan kurva *inverse*-nya saja.
4. Terdapat beberapa bus yang memiliki nilai *incident energy* melebihi 40 cal/cm². Kondisi ini sangatlah berbahaya melihat

Personal Protective Equipment tingkat tertinggi yaitu tingkat 4 hanya mampu melindungi manusia dari bahaya *arc flash* dengan nilai *incident energy* 40 cal/cm². Sehingga ketika terjadi *arc flash* pada bus tersebut, walaupun manusia telah mengenakan PPE tingkat 4 tetap akan terluka.

5. Rele yang memiliki *output* kontaktor harus di-*backup* oleh *fuse* untuk mengamankan gangguan hubung singkat, karena kontaktor hanya dapat memutus gangguan beban lebih. Apabila kontaktor digunakan untuk memutus gangguan hubung singkat seperti pada kondisi *Existing* Tipikal 1 akan berbahaya.

5.2 Saran

Dengan mempertimbangkan hasil studi koordinasi proteksi dan *arc flash* pada sistem kelistrikan PT. Pupuk Sriwidjaya Palembang (Pusri) IB dan untuk menjaga kontinuitas penyaluran daya dan keamanan pekerja, penulis menyarankan beberapa hal sebagai berikut:

1. Untuk koordinasi proteksi yang lebih maksimal, penulis menyarankan rele Basler Electric BE1-51 diganti dengan rele tipe lain seperti pada Relay 3 yaitu Merlin Gerin Sepam 2000 yang memiliki penyetelan *time delay* untuk *instataneous*-nya. Hal ini disebabkan rele yang memiliki karakteristik seperti Basler Electric BE1-51 harus melakukan *current grading* untuk mencapai *grading time* yang baik dengan rele lainnya. Rele seperti ini lebih cocok digunakan pada sistem yang memiliki perbedaan arus hubung singkat yang besar. Sedangkan sebagai contoh pada Tipikal 1 arus hubung singkat yang mengalir pada Relay 1 dan Relay 2 tidak memiliki perbedaan yang signifikan. Sehingga waktu *trip* kedua rele ini hampir bersamaan.
2. Penggunaan kombinasi kontaktor dan *fuse* sebaiknya diganti dengan *High Voltage Circuit Breaker* (HVCB). Alasan pertama yaitu sebagai alat pemutus HVCB mampu mengamankan gangguan beban lebih maupun gangguan hubung singkat. Alasan kedua yaitu ketika terjadi hubung singkat *fuse* akan melebur untuk mengisolasi gangguan, untuk mengamankan dari gangguan selanjutnya *fuse* ini harus diganti dengan yang baru. Dengan kedua alasan tersebut penulis menilai penggunaan HVCB lebih efisien dibandingkan kombinasi kontaktor dan *fuse*.
3. Penulis menyarankan untuk segera memperbaiki koordinasi proteksi pada bus-bus yang memiliki nilai *incident energy*

melebihi standar NFPA 70E 2009 karena dengan kondisi seperti ini walaupun pekerja mengenakan PPE tingkat tertinggi tidak ada yang bisa menjamin keselamatannya.

----- *Halaman Ini Sengaja Dikosongkan* -----

DAFTAR PUSTAKA

- [1] IEEE Std 242-2001™, “*IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems*”, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, Ch. 15, 2001
- [2] IEEE Std 1584™ – 2002, “*IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculation*”, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, 2002.
- [3] NFPA 70E-2009, “*Standard for Electrical Safety in the Workplace.*”
- [4] Pujiantara, Margo, “*Kuliah Desain Sistem Tenaga Listrik*”, Teknik Elektro ITS, Surabaya, 2016
- [5] Lazar, Irwin, “*Electrical System Analysis and Design for Industrial Plants*”, McGraw-Hill, Inc., USA, Ch.1, Ch.4, 1980.
- [6] K. R. Shah, Life Senior Member, A. Cinsavich, P. De Silva, “*Impact of Arc Flash Hazards on Medium Voltage Switchgear.*”
- [7] J. Simms and G. Johnson, “*Protective Relaying Methods for Reducing Arc Flash Energy,*” *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 49, no. 2, pp. 803–813, Mar. 2013.
- [8] Anderson, P.M., “*Power System Protection*”, IEEE Press Power Engineering Series, New York, 1999
- [9] Gers, Juan M., dan Holmes, Edward J., “*Protection of Electrical Distribution Network 2nd Edition*”, The Institution of Electrical Engineers, London, Ch. 5, 2004
- [10] Wahyudi, “*Diktat Kuliah Pengaman Sistem Tenaga Listrik*”, Teknik Elektro ITS, Surabaya, Bab 2, 2004
- [11] ABB, 1MRS 750629, “*SPAJ 140 C Overcurrent and earth-fault relay User’s manual and Technical description*”.
- [12] ABB, 1MRS 750637-MUM EN, “*SPAM 150 C Motor protection relay User’s manual and Technical description*”
- [13] Basler Electric, 9137200997, “*INSTRUCTION MANUAL FOR TIME OVERCURRENT RELAY BE1-5I*”
- [14] Schneider Electric, “*Protection and control Sepam range Sepam 2000 Substation, busbars*”.
- [15] General Electric, GEK—49946E, “*TIME OVERCURRENT RELAYS WITH VOLTAGE RESTRAINT TYPES IFCV51AD IFCV51BD*”.
- [16] Multilin, “*139 SERIES MOTOR PROTECTION RELAY*”

----- *Halaman Ini Sengaja Dikosongkan* -----

BIOGRAFI PENULIS



Aditya Catur Nugraha, dilahirkan pada tanggal 7 April 1995 di kota Bandar Lampung, Lampung. Anak ke empat dari empat bersaudara. Penulis menempuh pendidikan TK, SD, SMP, dan SMA di Bandar Lampung selama kurang lebih 14 tahun. Penulis memulai pendidikan formal di TK Al-Kautsar Bandar Lampung pada tahun 1999-2001, SD Al-Kautsar Bandar Lampung pada tahun 2001-2007, SMPN 2 Bandar Lampung pada tahun 2007-2010, dan SMAN 2 Bandar Lampung pada tahun 2010-2013. Pada tahun 2013 penulis memutuskan untuk meninggalkan pulau Sumatera dan merantau ke tanah Jawa. Sejak tahun 2013

penulis menempuh pendidikan sebagai mahasiswa bidang studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknologi Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Penulis dapat dihubungkan melalui email adityacatur7@gmail.com.

-----*Halaman Ini Sengaja Dikosongkan*-----